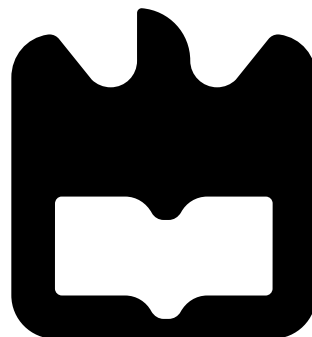




**Diogo Franco  
Avelar**

**Projeto e construção de um sistema de gestão de  
uma bateria com carregamento rápido**







**Diogo Franco  
Avelar**

**Projeto e construção de um sistema de gestão de  
uma bateria com carregamento rápido**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins (orientador), Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e do Professor Doutor Ernesto Fernando Ventura Martins (co-orientador), Professor Associado do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.





**o júri / the jury**

presidente / president

**Professor Doutor Paulo Bacelar Reis Pedreiras**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (por delegação do Vice-Reitor da Universidade de Aveiro)

vogais / examiners committee

**Professor Doutor Vítor Manuel Grade Tavares**

Professor Auxiliar da Universidade do Porto

**Professor Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins**

Professor auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)



## **agradecimentos / acknowledgements**

É meu dever, mas muito maior é o meu prazer, registar um especial agradecimento aos meus pais e avós, por todo o apoio, demonstrado das mais diversas formas, ao longo deste ciclo que agora termina.

Quero também, reconhecidamente agradecer, a ajuda, a colaboração e a paciência, que, amigos, professores, colegas e funcionários da UA fizeram o favor de me dispensar, durante estes anos, em que cheguei a esta ocasião, entrega da tese de mestrado em Engenharia Eletrónica e de Telecomunicações, objetivo que almejei, há mais de meia dúzia de anos, lá longe, no meio do Atlântico Norte, na ilha das Flores, onde acaba a Europa e começa o novo Mundo.

É com o devido orgulho, por ter sido estudante nesta instituição que reitere a todos, sem excepção, a minha gratidão, não podendo, por força do contributo especial que me facultaram, e sem os quais esta etapa da minha vida teria sido muito mais difícil, manifestar um especial reconhecimento:

- Ao Professor Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins, por toda a disponibilidade e orientação que ofereceu ao longo do desenvolvimento deste projeto.
- Ao Rómulo José Magalhães Martins Antão por toda a ajuda.
- À Escola Básica 1,2,3/JI/S Padre Maurício de Freitas.



**Palavras-chave**

Veículo Elétrico; Bateria; Controlo de células; Carregamento rápido;

**Resumo**

Os veículos de cariz pessoal são utilizados globalmente, por um elevado número de pessoas. A subida no preço dos combustíveis fósseis, e toda a poluição associada ao processo de conversão energética, acentuou nos últimos anos a procura por combustíveis mais baratos e menos poluentes.

A construção de veículos elétricos, apresenta como maior limitação, um sistema de carga portátil. Assim sendo, este trabalho explora esta área de investigação e ao longo dele projecta-se um sistema de bateria inteligente. Também se efetua uma análise, aos protocolos existentes, com vista a realizar um carregamento do tipo rápido.



**Keywords**

Electric Vehicle; Battery; Cell Control; Fast Charging

**Abstract**

A lot of people all over the World, have been using personal vehicles for long. But there is a rising demand for a cheaper kind of fuel, as well as for a less polluting one.

Assuming that electric vehicles will be part of the solution, one of them problems is related to the battery. This work studies and develops a smart battery system. Some information about the fast charging protocols are as well documented.





# Conteúdo

<b>Conteúdo</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Acrónimos</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objectivos . . . . .	1
1.3 Metodologia . . . . .	2
1.4 Estrutura da Dissertação . . . . .	2
<b>2 Análise Geral</b>	<b>5</b>
2.1 Protocolos de Carregamento . . . . .	5
2.2 Células de Bateria . . . . .	7
<b>3 Carregamento de Baterias em EV's</b>	<b>9</b>
3.1 CHAdeMO . . . . .	13
3.1.1 Funcionamento do protocolo . . . . .	13
3.2 CCS . . . . .	14
3.2.1 Funcionamento do Protocolo . . . . .	18
<b>4 Baterias Elétricas</b>	<b>23</b>
4.1 Células . . . . .	23
4.1.1 NiCd . . . . .	25
4.1.2 NiMH . . . . .	28
4.1.3 Chumbo-Ácido . . . . .	30
4.1.4 Iões de Lítio . . . . .	33
4.1.5 Lítio-Polímero . . . . .	35
4.2 Sistema de Gestão -BMS . . . . .	36
4.2.1 Equalização de células . . . . .	40
4.2.2 Estado de Carregamento -SOC . . . . .	40
4.2.3 Comunicação . . . . .	43

<b>5</b>	<b>Construção do Protótipo</b>	<b>45</b>
5.1	Hardware . . . . .	45
5.1.1	Medição do potencial, corrente e temperatura / Equalização das células	47
5.1.2	Ventilação das células . . . . .	54
5.1.3	Alimentação . . . . .	54
5.1.4	Comunicação . . . . .	54
5.1.5	Controlo . . . . .	56
5.2	Software . . . . .	57
5.2.1	Funcionamento Normal . . . . .	57
5.2.2	Comunicação . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Testes e Resultados</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>Conclusão e Trabalhos Futuros</b>	<b>91</b>
7.1	Conclusão . . . . .	91
7.2	Trabalhos futuros . . . . .	92
7.2.1	Modificações ao circuito inicial . . . . .	92
	<b>Referências</b>	<b>95</b>

# Lista de Acrónimos

**AC** Alternating Current

**DC** Direct Current

**BMS** Battery Management System

**EV** Electric Vehicle

**PLC** Power Line Communication

**PCB** Printed Circuit Board

**CCS** Combined Charging System

**EVSE** Electric Vehicle Supply Equipment

**SAE** Society of Automotive Engineers

**IEC** International Technical Commission

**CAN** Controller Area Network

**V2H** Vehicle To Home

**SOC** State Of Charge

**SLI** Starting, Lightning, Ignition

**SLA** Sealed Lead-Acid

**VRLA** Valve Regulated Lead-Acid

**FLA** Flooded Lead-Acid

**PP** Proximity Pin

**CP** Control Pilot

**DOD** Depth Of Discharge

**SOH** State Of Health

**OCV** Open Circuit Voltage

**RNA** Rede Neural Artificial

**RBF** Radial Base Functions

**SVM** Support Vector Machine

**CI** Circuito Integrado

**DFD** Diagrama de Fluxo de Dados

**BFSK** Binary Frequency Shift Keying

**OCM** Output Compare Module

**SMD** Surface Mount Device

**OPAMP** Operational Amplifier

# Lista de Figuras

3.1	Instalação elétrica para carregamento em modo 1, com componentes da Siemens [11]. . . . .	10
3.2	Instalação eléctrica para carregamento em modo 2, com componentes da Siemens [11]. . . . .	10
3.3	Instalação elétrica para carregamento em modo 3, com componentes da Siemens [11]. . . . .	12
3.4	Instalação elétrica para carregamento em modo 4, com componentes da Siemens [11]. . . . .	12
3.5	Conectores da norma 62916 s/ o conector da CHAdeMO [12]. . . . .	14
3.6	Evolução do número de estações de carregamento do tipo CHAdeMO [13]. . .	15
3.7	Conector para carregador com o protocolo CHAdeMO [14]. . . . .	16
3.8	Circuito para carregamento no protocolo CHAdeMO [14] . . . . .	17
3.9	Conector Mennekes 62196-2 [15]. . . . .	19
3.10	Circuito típico para pino de controlo [16]. . . . .	21
4.1	Célula e baterias de uma e de cinco células [1]. . . . .	24
4.2	Estrutura básica de uma célula de bateria [1]. . . . .	25
4.3	Densidades energéticas por peso e por volume de células recarregáveis tipicamente utilizadas [2]. . . . .	26
4.4	Estrutura básica de uma bateria cilíndrica de NiCd [3]. . . . .	28
4.5	Estrutura básica de uma bateria cilíndrica/prismática de NiMH [4]. . . . .	29
4.6	Estrutura básica de uma bateria de chumbo-ácido [5]. . . . .	31
4.7	Estrutura básica de uma bateria de iões de Lítio- 18650 [6]. . . . .	34
4.8	Estrutura básica de uma bateria de lítio-polímero [7]. . . . .	37
4.9	Estrutura básica de uma sistema de gestão de uma bateria [8]. . . . .	37
4.10	Bateria de alto potencial, -Topologia em estrela [2]. . . . .	39
4.11	Bateria de alto potencial, -Topologia em anel [2]. . . . .	39
4.12	Topologias para equalização ativa de baterias. <i>cell-to-bat; bat-to-cell; cell-to-cell</i> [9] . . . . .	41
4.13	Circuito básico para comunicação PLC em DC-BUS [10]. . . . .	44
5.1	Dimensões dos módulos a construir. (h=210mm, l=85mm e w=60mm) . . . .	47
5.2	Dimensões da PCB. (h=200mm e l=80mm) . . . . .	48
5.3	Ligações entre a PCB e as células. (Escala de apresentação das células muito reduzida). . . . .	49

5.4	Esquema exemplificativo para medição do potencial e corrente / Equalização das células / ON-OFF . . . . .	50
5.5	Circuito utilizado para medição de potencial na célula 3 do canal 1. . . . .	50
5.6	Circuito utilizado para equalização de potencial na célula 3 do canal 1. . . . .	51
5.7	Circuito utilizado para medição da corrente no canal 1. . . . .	52
5.8	Circuito utilizado para enable e disable no canal 1. . . . .	52
5.9	Circuito para medição do potencial, corrente e temperatura / Equalização das células / ON-OFF . . . . .	53
5.10	Circuito para controlo da ventoinha. . . . .	55
5.11	Circuitos de alimentação. . . . .	55
5.12	Circuito de transmissão PLC. . . . .	56
5.13	Simulação ao barramento DC-BUS com modulação BPSK. . . . .	57
5.14	Filtro para recepção PLC. . . . .	58
5.15	Simulação da resposta em frequência do filtro. . . . .	60
5.16	Micro-controlador com respetiva associação de pinos. . . . .	61
5.17	Distribuição da electrónica pela PCB. . . . .	62
5.18	Funcionamento do software -Função main. . . . .	63
5.19	Funcionamento do software -Função CheckLimits. . . . .	64
5.20	Funcionamento do software -Função CheckState. . . . .	65
5.21	Funcionamento do software -Função discProtocol. . . . .	66
5.22	Funcionamento do software -Algoritmo de desmodulação. . . . .	66
5.23	Sinal criado para simulação da desmodulação; Conteúdo espectral de frequências deste sinal. . . . .	67
5.24	Resultado na saída do algoritmo de desmodulação. . . . .	67
6.1	Módulo construído com 3 das 24 células acopladas. . . . .	70
6.2	Circuito para teste à medição da corrente de carregamento. . . . .	71
6.3	Interface de comunicação com o micro-controlador do módulo. . . . .	71
6.4	Sistema utilizado para teste à comunicação PLC. . . . .	74
6.5	Interfaces de comunicação com o módulo da bateria e a DETPIC32 durante a transmissão de um char. . . . .	76
6.6	Interfaces de comunicação com o módulo da bateria e a DETPIC32 durante a transmissão de 5 char's. . . . .	76
6.7	Sinais no emissor e no filtro do recetor PLC -Sequência 0100. . . . .	77
6.8	Sinais medidos com osciloscópio aos terminais de uma resistência de $100\Omega$ , quando a carga é o circuito impresso, a uma frequência de $3850Hz$ . . . . .	78
6.9	Sinais medidos com osciloscópio aos terminais de uma resistência de $100\Omega$ , quando a carga é o circuito impresso, a uma frequência de $2650Hz$ . . . . .	79
6.10	Processo de equalização das células. . . . .	79
6.11	Teste ao corte da descarga sem optocoupler. . . . .	80
6.12	Teste ao corte da descarga com optocoupler. . . . .	81
6.13	Simulação da característica de saída, de um transistor de potência, com diferentes valores de $V_{GS}$ . . . . .	82
6.14	Simulação da diferença de condução, de um transistor de potência, entre o primeiro e terceiro quadrante. . . . .	82
6.15	Teste ao sensor de temperatura, com carga. . . . .	83
6.16	Resultados do teste ao sensor de temperatura quando acoplado a uma célula. . . . .	84

6.17	Resultados do teste ao sensor de temperatura com aplicação direta de calor. .	84
6.18	Variação do potencial nas células ao longo da descarga. . . . .	86
6.19	Variação da corrente ao longo da descarga. . . . .	87
6.20	Variação do potencial nas células ao longo do processo de carregamento. . . .	88
6.21	Variação da corrente ao longo do processo de carregamento. . . . .	89
7.1	Circuito alterado -Medição do potencial, corrente e temperatura / Equalização das células. . . . .	93





# Lista de Tabelas

3.1	Especificações do carregamento de Ev's no modo 1 [18]. . . . .	9
3.2	Especificações do carregamento de Ev's no modo 2 [18]. . . . .	10
3.3	Especificações do carregamento de Ev's no modo 3 [18]. . . . .	11
3.4	Especificações do carregamento de Ev's no modo 4 [18]. . . . .	11
3.5	Estados do sistema -Comunicação no pino CP [19]. . . . .	20
3.6	Especificações do carregamento de Ev's no modo 4 [18]. . . . .	21
4.1	Lista de potenciais para possíveis elétrodos do cátodo [2]. . . . .	26
4.2	Principais características das células de <i>NiCd</i> [17]. . . . .	29
4.3	Principais características das células de <i>NiMH</i> [17]. . . . .	31
4.4	Principais características das células de <i>chumbo – ácido</i> [17]. . . . .	33
4.5	Principais características das células de lítio recarregáveis [17]. . . . .	35
5.1	Características de algumas células cilíndricas do fabricante <i>Panasonic</i> . . . . .	46
5.2	Principais funções/registos presentes no microcontrolador [18]. . . . .	59
6.1	Teste, com recurso a fonte, para simulação da descarga. . . . .	72
6.2	Teste, com recurso a fonte, para simulação do carregamento. . . . .	73



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

Desde meados do século transato que os veículos pessoais se têm vindo a tornar imprescindíveis no quotidiano de um grande número de famílias por todo o Globo. A sua produção em massa, esteve e está associada ao tipo de energia utilizada no motor de combustão interna, isto é, os combustíveis fósseis derivados do petróleo. Enquanto o progresso na indústria dos motores de combustão interna é evidente, os recursos petrolíferos, face à procura acentuada de uma grande parte das mais diversas indústrias globais, atingem valores económicos elevados, o que se traduz numa maior carga financeira para os utilizadores de um veículo pessoal. Pelo que emerge uma necessidade de se encontrar uma alternativa em prol da sustentabilidade dos veículos pessoais, bem como da sustentabilidade ambiental do Mundo, uma vez que os motores de combustão, emitem gases no processo de transformação de energia, considerados perigosos a longo prazo pela comunidade científica. Assim, a solução passa certamente por encontrar uma alternativa mais barata e menos poluente.

A energia eléctrica da rede nacional, muita dela produzida por fontes de energia renováveis tem sido desde sempre utilizada por diversos tipos de motores, nomeadamente nos comboios, o que aparentemente fornece uma alternativa viável aos sistemas de combustão, tanto económica como ambiental. Esta mesma hipótese desenvolvida deu origem aos carros eléctricos com a grande particularidade destes exigirem um sistema de armazenamento de energia, a bateria. Pelo que, sendo a bateria responsável para determinar a autonomia do veículo, bem como para condicionar o seu preço, torna-se essencial uma análise detalhada a esta fonte de energia.

É tendo em conta o atrás exposto, conjuntamente com o facto das tecnologias de ponta na matéria, incidirem sobre o carregamento rápido de baterias e do seu controlo, que me proponho a analisar e desenvolver o tema ao longo desta dissertação.

### 1.2 Objectivos

Ao longo deste trabalho pretende-se criar um dos módulos de uma bateria inteligente. Ou seja, irá ser desenvolvido com recurso a células standard de lítio do tipo 18650 (de uso comum em baterias de computadores portáteis), um módulo de 12V com aproximadamente 25Ah, que ligado a outros idênticos constitui uma bateria de potencial e corrente ajustáveis que poderá ser parte integrante de qualquer "EV(Electric Vehicle)". Para dar "inteligência" a esses mesmos módulos, irá ser criado com recurso a um micro-controlador, um "BMS(Battery

Management System)”, que permite monitorizar e controlar as condições principais, a que estão sujeitas cada célula da bateria.

Posteriormente, pretende-se implementar um sistema de carregamento rápido ”DC(Direct Current)”, baseado nos protocolos existentes. Para tal e para permitir um melhor controlo sobre cada um dos módulos e das suas células, irá ser criado um sistema de comunicação por ”PLC(Power Line Communication)”.

A bateria deverá assegurar como principais funcionalidades:

- Permitir ligar/desligar um conjunto de células.
- Medição do potencial, corrente e temperatura em cada uma das células.
- Comunicação por PLC entre módulos para algoritmos de controlo.
- Executar as medições necessárias à implementação de um protocolo de carregamento rápido em DC.
- Calcular o ”SOC(State Of Charge)”, e ”SOH(State Of Health)”, da bateria por forma a comunicá-lo ao computador central do EV.

### 1.3 Metodologia

Numa primeira fase seleccionaram-se as células de carga mais adequadas para o uso em EV's. A escolha incidiu sobre as células de iões de lítio, uma vez que essas fornecem as características mais adequadas para o efeito. Para mais informações consultar a secção 4.1.

De seguida, recorrendo a ferramentas digitais (nomeadamente, os softwares *MATLAB* e *PSPICE*), foi concebido e testado o circuito para a medição dos diferentes potenciais e correntes nas células, bem como o circuito de transmissão e recepção por PLC. Por forma a controlar estes, tendo em conta, o custo, os pinos e funcionalidades necessárias dos mesmos, escolheu-se um micro-controlador, de 16 bits, da Microchip [20].

Face à pretensão de que a bateria apresente uma elevada densidade energética com o menor auto-consumo possível, dependendo este directamente dos componentes eletrónicos, criteriosamente seleccionados, dimensionou-se a ”PCB(Printed Circuit Board)”dentro dos limites físicos pretendidos para o módulo. Optou-se, por uma arquitetura, em que a gestão global dos módulos e o carregamento rápido DC, será ligado, num circuito à parte, especificado, para o efeito. Este, comunica com os módulos, por PLC, assim como, executa, as especificações do protocolo de carregamento rápido IEC-61851, conhecido por *Combined Charging System*. No entanto, nesta dissertação, é apenas abordada, a implementação dos módulos em si.

Assim sendo, após conclusão da PCB, implementaram-se os devidos algoritmos de controlo para a gestão e carregamento DC da bateria, tendo-se executado os devidos testes para comprovar o adequado funcionamento do mesmo.

### 1.4 Estrutura da Dissertação

O presente documento encontra-se seccionado em 7 capítulos nos quais se abordam de forma teórica e experimental os temas anteriormente apresentados, bem como se justificam todas as decisões relevantes que levaram à obtenção do dispositivo final, i.é., do módulo da bateria. A seguinte lista descreve de forma sucinta o conteúdo de cada um deles:

- **Introdução** - Define de forma breve todo o projeto, nomeadamente os motivos que levaram à sua execução, o objetivo final e a forma utilizada para o atingir.
- **Análise Geral** - Resumo assente na atualidade dos protocolos de carregamento rápido DC e das baterias para carros elétricos.
- **Baterias Elétricas** - Análise às baterias elétricas recarregáveis e aos seus constituintes.
- **Carregamento de Baterias em EV's** - Análise às diferentes normas existentes para o carregamento de veículos elétricos e protocolos para o carregamento DC.
- **Construção do Protótipo** - Toda a informação sobre o desenvolvimento do protótipo ao nível de hardware e software.
- **Testes e Resultados** - Conjunto de testes para verificar o funcionamento do módulo.
- **Conclusão e Trabalhos Futuros** - Algumas sugestões sobre possíveis alterações no circuito, bem como o trabalho a desenvolver na sequência deste.



## Capítulo 2

# Análise Geral

### 2.1 Protocolos de Carregamento

Desde que surgiram os primeiros carros elétricos, com fins de utilização pessoal, que a indústria se tem deparado com diversos problemas relacionados com a sua autonomia. Para além do veículo estar limitado pela energia da bateria (que não consegue atingir a mesma eficiência energética por unidade de peso ou por unidade de área do que os motores de combustão), o longo período de tempo associado ao seu carregamento, também tem sido um grande entrave à sua afirmação no mercado.

A forma mais simples para o carregamento de uma bateria para veículos elétricos pode ser feita com recurso a uma tomada doméstica [18]. Como o sinal elétrico é distribuído no modo "AC(Alternating Current)", o veículo fica encarregue da retificação do sinal para modo DC de forma a fazer o carregamento da bateria. No entanto, a corrente disponível num sistema elétrico doméstico é limitada, o que se traduz num período de carga que pode ir até às 8 horas. Para minimizar este problema foi necessário recorrer a sistemas capazes de fornecer mais corrente, utilizando-se a solução aparentemente mais disponível, uma tomada trifásica, conseguindo-se reduzir os tempos de carregamento, para intervalo compreendido, entre metade e um terço.

Porém, para a autonomia apresentada por uma bateria, 3 horas de carregamento continua a ser um acima daquilo que muitos utilizadores consideram "cómodo". Na procura por um menor tempo de carregamento, o valor de corrente fornecida aos veículos cresceu até atingir um ponto em que a comunidade científica, achou necessário implementar normas para assegurar a integridade de todo o equipamento, bem como do utilizador aquando do manuseamento do mesmo. Foram criados os protocolos de carregamento AC, bem como as estações de carregamento, "Electric Vehicle Supply Equipment", que entregam corrente no modo AC.

Conforme exposto anteriormente, a entrega de corrente em modo AC, requer por parte do veículo equipamento para retificação do sinal. Este aumento no valor da corrente a retificar também se traduz num aumento dos componentes para o fazer.

No ano de 2010, surge no Japão uma associação, criada pelos principais fabricantes de carros nacionais, com uma ideia inovadora que consiste resumidamente em fornecer a corrente em modo DC e deixar o equipamento de retificação do lado da "EVSE(Electric Vehicle Supply Equipment)". No que toca ao fornecimento de corrente, este modo é praticamente ilimitado (mas as células e o restante equipamento não!) o que torna necessária a troca de mais informação, entre o veículo e a estação de carregamento. Toda a informação que ne-

cessita partilha, bem como todos os limites, encontram-se definidos num protocolo de nome CHAdeMO.

Este mesmo protocolo, criado por uma associação com o mesmo nome, da qual são membros a Nissan, a Mitsubishi, a Toyota, entre outros, rapidamente se lançou no mercado, conseguindo ser pioneira na instalação de EVSE's de carregamento rápido por todo o Mundo, nomeadamente na Europa onde se assistiu a um forte financiamento na tentativa de forçar a entrada de EV's no mercado. Com a Nissan sempre assumindo o papel de principal destaque na associação, vários veículos foram produzidos com a opção de carregamento rápido DC com conector individual para o efeito. A implementação destas estações pela Europa despoletou o interesse de todos os fabricantes de EV's, com a consequente utilização deste protocolo por algumas produtoras Francesas.

Este domínio de mercado por parte do protocolo CHAdeMO começa a ter contornos complexos, quando por volta do ano 2012 a *Society of Automotive Engineers* (SAE), uma sociedade Americana, anuncia um protocolo de carregamento rápido DC em consórcio com a International Electrotechnical Commission (IEC). É importante salientar que estas duas instituições anteriormente referidas, definem as normas para os protocolos de carregamento AC nos Estados Unidos da América e na Europa, respetivamente. Assim sendo, lançaram um protocolo baseado nos conectores já existentes para o carregamento AC, que permite ambos os modos, AC e DC, atribuindo-lhe o nome de "CCS(Combined Charging System)". Rapidamente os fabricantes de carros americanos se associam ao protocolo e com eles, os Alemães.

Inicia-se assim uma "guerra" entre protocolos que faz recordar outras no Mundo tecnológico, tal como o DVD vs LaserDisc ou o FireWire vs USB. Por parte da CHAdeMO alegou-se a existência de um protocolo, com a maior parte dos problemas de conceção já ultrapassados, com muitas estações de carregamento distribuídas por todo o Globo. Por parte da CCS defendeu-se a uniformização dos conectores de carregamento, a capacidade de fornecer maior corrente ao veículo e a inclusão fácil num sistema de "Rede Elétrica Inteligente". Enquanto os defensores de um ou de outro protocolo se debatiam sobre a melhor solução, a Tesla, uma marca de carros elétricos Americana, lança um protocolo de carregamento rápido DC, próprio para os seus veículos, que consegue rácios de carregamento idênticos aos propostos pelo CCS. Este protocolo chama-se *SuperCharger*. No início do mês de Junho do presente ano, esta produtora veio anunciar que irá fornecer a tecnologia avançada que utiliza, a toda a comunidade científica, na tentativa de acelerar o processo de desenvolvimento de EV's pelo Globo [21]. Dias depois, a Tesla veio através do seu site oficializar esta notícia, confirmando de que as suas patentes iriam ser disponibilizadas de forma gratuita [22].

Decorria o Ano de 2013 quando o Parlamento Europeu, que assume como norma os protocolos definidos pelo IEC, anunciou a pretensão de uniformizar os conectores de carregamento até ao Ano de 2020 e que deixaria de financiar a instalação de EVSE's do tipo CHAdeMO, atingindo agora a "batalha" outro patamar, o político [23]. Esta decisão gerou muita controvérsia e muitos dos entendidos na matéria julgaram como certo o fim do protocolo nestas condições, considerando que futuramente o mais certo seria a utilização do CCS.

Em Março de 2014, após uma ríspida "guerra" entre o Parlamento Europeu e a CHAdeMO [24], esta organização tornou-se membro do IEEE-SA e foi rapidamente reconhecido como um protocolo DC pelo IEC [13]. Mais recentemente, o Parlamento Europeu veio anunciar que pretende instalar EVSE's, que permitam os dois tipos de carregamento, o que representa uma grande vitória para o protocolo, que encara agora o futuro numa melhor perspetiva.

Uma das maiores produtoras de EVSE's a nível Mundial de momento, encontra-se sediada



em Portugal: a EFACEC, fazendo parte da sua gama de produtos estações de carregamento do tipo CHAdeMO/CCS [25].

Também é importante realçar, a produção de EVSE's, por parte de uma empresa sediada em Aveiro, de nome *Magnum Cap*, que possui, já, uma diversa gama de produtos, nesta área.

## 2.2 Células de Bateria

Este trabalho não tem como principal objetivo analisar as células da bateria em si mas sim a eletrónica de controlo a elas associada. No entanto, é importante evidenciar o progresso científico que se atingiu recentemente, nesta área de investigação.

Uma análise às tecnologias utilizadas nas baterias de EV's reflete essencialmente que a investigação nesta área não tem sido especificamente desenvolvida, no entanto, esta tem vindo a tirar partido de todo o desenvolvimento inerente aos componentes portáteis, tais como, computadores, telemóveis e outros onde a densidade energética é circunstancial. Neste aspeto, as células de iões de Lítio (*Li – Ion*) são as que melhor cumprem o requisito, pelo que a tecnologia para EV's tem estado essencialmente associada a este tipo de células [26].

Em relação a estas células, neste momento, a tecnologia procura melhorar o seu desempenho a todos os níveis, e é considerada pela comunidade científica uma tecnologia com potencial de desenvolvimento. No entanto estas são caras, apresentando uma durabilidade limitada sendo facilmente inflamáveis se sujeitas a condições extremas. Por outro lado, apresentam boas características que as fazem ser as mais utilizadas no desenvolvimento de baterias de EV's. De entre, as diversas células, contruídas, com a tecnologia de lítio, aquelas com melhores propriedades físicas para um bom acondicionamento no EV, são as de polímeros-lítio.

Uma outra tecnologia já num grau mais avançado de desenvolvimento recorre a células de Hidreto Metálico de Níquel (*Ni – MH*) que sendo uma tecnologia mais experimentada, é considerada por muitos como uma excelente alternativa ao Li-Ion pelo seu custo, bem como pela estabilidade física da célula em si. Esta tecnologia foi utilizada em muitos veículos híbridos. Todavia, uma patente sobre este tipo de tecnologias para EV's, tem condicionado muito a sua utilização[27]. Essa patente, foi registada pela *Ovonics Battery Company*, que mais tarde foi adquirida parcialmente pela *General Motors*. Ulteriormente, empresas ligadas á comercialização de combustíveis adquiriram esses mesmos direitos. A ligação entre uma patente para carros elétricos e uma empresa de combustíveis, é aparentemente suspeita, confirmando-se mais tarde que a comercialização de produtos ao abrigo desta, foram sempre muito controlados e limitados, resultando em várias disputas na justiça.

Muitas outras pesquisas, no que toca á composição física das baterias continuam a ser desenvolvidas por diversos laboratórios. Enquanto muitas dessas investigações se debatem sobre as células de lítio, nomeadamente com algumas alterações das propriedades químicas do cátodo ou do ânodo da célula, há uma com maior destaque na atualidade, designada por *Dual Carbon Batteries*, que em português se pode ler como "Baterias de Carbono Duplo", que como o próprio nome indica, recorre ao carbono tanto para o cátodo como para o ânodo, utilizando um material orgânico com iões de lítio, como eletrólito.

De momento já existem células com melhores propriedades do que as normalmente utilizadas, mas o seu elevado custo, as condições de utilização e o facto de serem potencialmente perigosas, faz com que estas não sejam muito utilizadas para além das experiências laboratoriais.



## Capítulo 3

# Carregamento de Baterias em EV's

Já foi referido anteriormente que os veículos elétricos podem ser carregados de diversas formas. Este leque de hipóteses foi condensado numa norma, que define o equipamento necessário, bem como os limites que cada instalação pode suportar. Na Europa, o carregamento está dividido em 4 modos, cada um com propriedades distintas, e a informação encontra-se definida no documento IEC 61851:

- **Modo 1** : O primeiro modo está relacionado com o carregamento AC. É o modo mais disponível, uma vez que permite ao utilizador carregar o seu EV, em qualquer conector de eletricidade comum desde que exista uma ligação à terra na instalação, um corta circuitos de proteção contra sobrecarga e um circuito de proteção com descarga à terra.

Os limites definidos para este modo encontram-se na tabela 3.1.

<i>Potencial(VAC)</i>	<i>Corrente Máx.(I)</i>	<i>Potência(kW)</i>	<i>Tempo de Carga</i>
250 <i>Monofásico</i>	16	4	6 a 8 horas
480 <i>Trifásico</i>	16	7.7	2 a 3 horas

Tabela 3.1: Especificações do carregamento de Ev's no modo 1 [18].

É de notar que o tempo de carga foi estimado considerando uma bateria típica de um carro elétrico na ordem dos  $25kWh$ . A figura 3.1 apresenta um diagrama completo da instalação e conectores necessários à utilização deste modo, no presente caso, recorrendo a componentes da Siemens.

Mesmo sendo um modo de carregamento prático, as limitações temporais são evidentes.

- **Modo 2** : No segundo modo a corrente também é fornecida na forma AC, mas com valor superior. Para garantir a segurança em todo o processo, este requer funcionalidades adicionais, nomeadamente um conector específico por parte do EV (que possua um pino de controlo) e um cabo especial que contém um módulo que assegura a proteção no processo, conjuntamente com o pino já referido. Os restantes componentes utilizados na instalação doméstica pelo modo 1, também são necessários neste.

Este modo está definido com os limites presentes na tabela 3.2

A figura 3.2 reflete as principais diferenças entre modos já acima referidas.

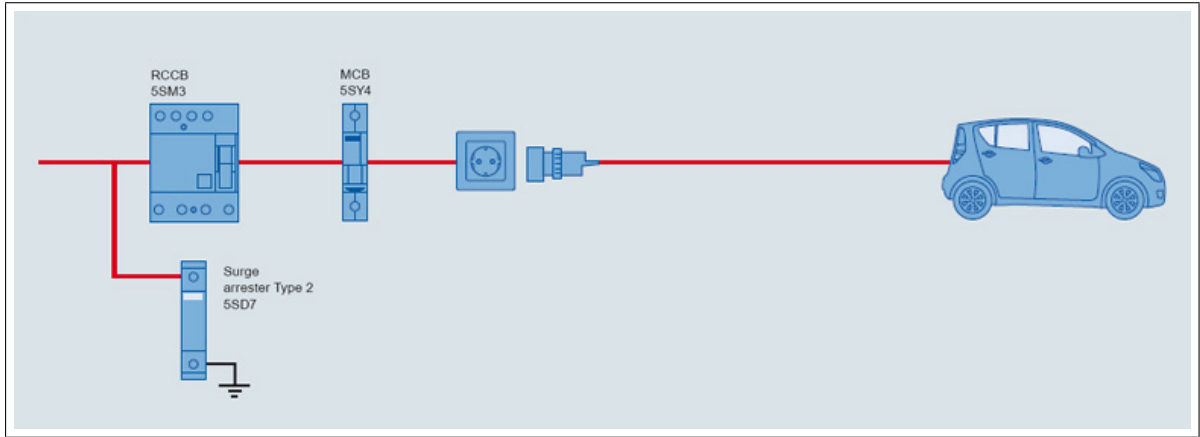


Figura 3.1: Instalação elétrica para carregamento em modo 1, com componentes da Siemens [11].

<i>Potencial(VAC)</i>	<i>Corrente Máx.(I)</i>	<i>Potência(kW)</i>	<i>Tempo de Carga</i>
250 <i>Monofásico</i>	32	8	3 a 4 horas
480 <i>Trifásico</i>	32	15.3	1 a 2 horas

Tabela 3.2: Especificações do carregamento de Ev's no modo 2 [18].

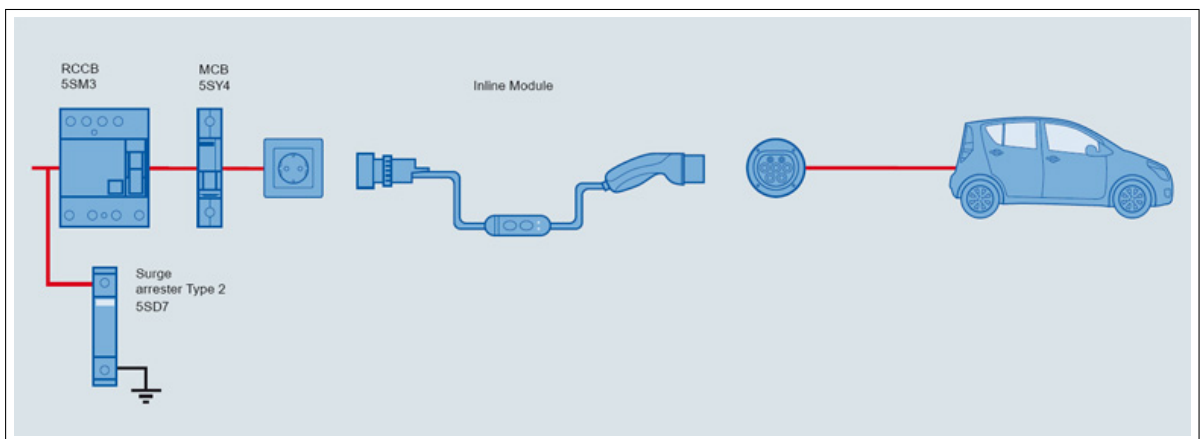


Figura 3.2: Instalação eléctrica para carregamento em modo 2, com componentes da Siemens [11].

Analisando a tabela, conclui-se que os tempos de carregamento são relativamente metade dos associados ao modo 1, pelo que este se apresenta como uma boa alternativa. Devido à especificidade do cabo, esta solução é dispendiosa.

- **Modo 3** : Este é o último dos modos, no qual a transferência de corrente se procede na forma AC. Como esta pode atingir valores altos, ao ponto de danificar a bateria a ser recarregada, mais informação tem que ser partilhada entre o EV e a instalação que lhe fornece energia, o que torna necessário a presença de uma EVSE no sistema. O cabo referido no modo 2, pode ser utilizado neste tipo de instalação, no entanto, a corrente será limitada ao valor atrás apresentado.

A tabela 3.3 apresenta alguns detalhes sobre este modo.

<i>Potencial(VAC)</i>	<i>Corrente Máx.(I)</i>	<i>Potência(kW)</i>	<i>Tempo de Carga</i>
250 <i>Monofásico</i>	250	62.5	20 a 30 <i>minutos</i>
480 <i>Trifásico</i>	250	120	10 a 20 <i>minutos</i>

Tabela 3.3: Especificações do carregamento de Ev's no modo 3 [18].

A ilustração presente na figura 3.3 é elucidativa quanto às diferenças entre este e os restantes modos.

É necessário perceber que os limites acima apresentados correspondem aqueles que o equipamento de transferência de energia suporta. Assim, uma vez que a corrente é entregue no modo AC, necessita de retificação por parte do veículo. Também é importante referir, que as células da bateria no processo de carga aquecem, o que pode levar à sua destruição, logo torna-se essencial o controlo da sua temperatura, bem como da corrente que por elas flui. É necessária a utilização de um protocolo para garantir a partilha de toda a informação entre o EV e a EVSE.

- **Modo 4** : O último dos modos diz respeito à transferência de carga em modo DC. A EVSE torna-se responsável pela retificação do sinal. Assim sendo, é necessária mais alguma troca de informação entre a EVSE e o EV, antes de se dar início ao carregamento, nomeadamente o potencial da bateria, que é um parâmetro variável entre EV's, de acordo com as suas necessidades.

Os limites estipulados para este modo de carregamento encontram-se presentes na tabela 3.6.

<i>Potencial(VDC)</i>	<i>Corrente Máx.(I)</i>	<i>Potência(kW)</i>	<i>Tempo de Carga</i>
400 a 500	400	200	10 a 20 <i>minutos</i>

Tabela 3.4: Especificações do carregamento de Ev's no modo 4 [18].

Na figura 3.4 encontra-se presente toda a instalação necessária para processar um carregamento neste modo.

Comparativamente ao modo anterior é de notar que as EVSE's se tornam bastante mais caras, mas permitem aos EV's reduzir a sua eletrónica. Este modo, também necessita de utilizar um protocolo para troca de informação.

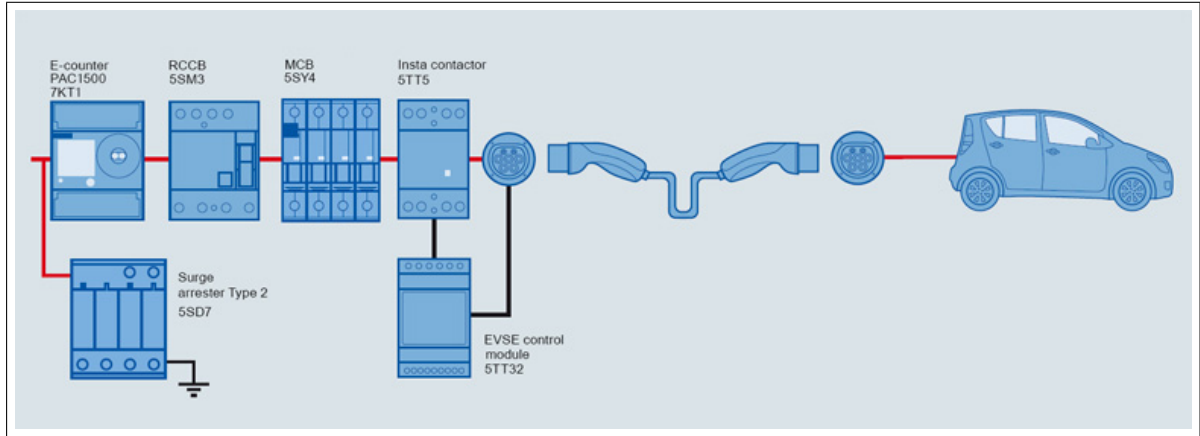


Figura 3.3: Instalação elétrica para carregamento em modo 3, com componentes da Siemens [11].

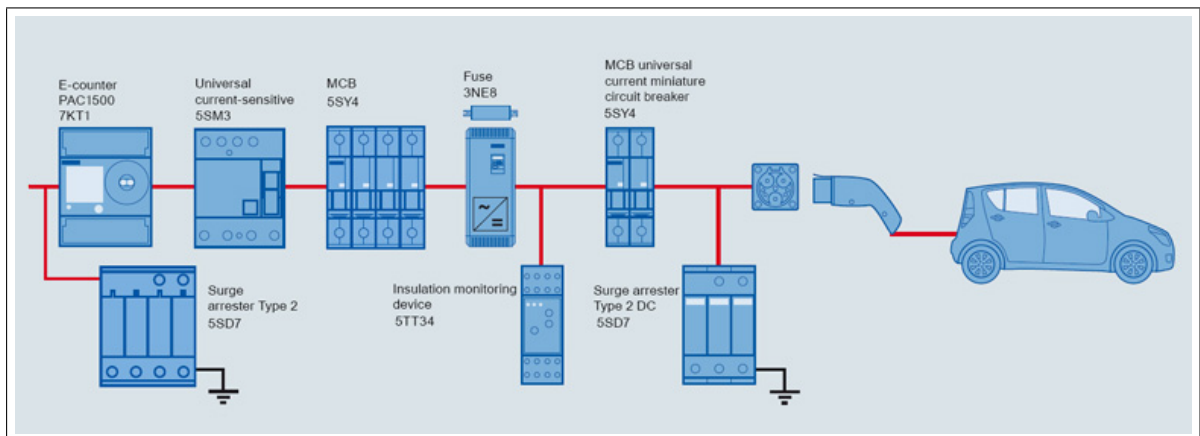


Figura 3.4: Instalação elétrica para carregamento em modo 4, com componentes da Siemens [11].

Estas variações de características entre cada modo traduzem-se num aumento de pinos nos conectores, i. é., a compatibilidade entre modos pode não ser assegurada.

Este problema, conforme foi descrito no capítulo 2.1, adicionou complexidade à afirmação dos EV's no mercado. Se da parte da EVSE se consegue solucionar o problema com recurso a uma estação multi-protocolo, da parte do veículo não faz sentido sobrecarregar este de conectores, que atingem dimensões consideráveis.

Uma análise aos conectores existentes (figura 3.5), uma vez mais definidos pelo IEC no documento IEC 62196, esclarece de forma mais eficaz o referido.

Como se verifica, os conectores utilizados na Europa são os do tipo 2. Também é possível verificar a compatibilidade entre o carregamento DC e AC para essas mesmas fichas. Isto significa que ao utilizar o CCS, basta selecionar um dos conectores disponíveis para que se possa processar o carregamento AC e DC. O mesmo já não acontece quando se recorre ao protocolo DC da CHAdeMO. É de notar que as redes elétricas nacionais, nem sempre se encontram preparadas para utilizar estes protocolos no seu máximo potencial.

As próximas duas secções contêm mais informação sobre os protocolos de carregamento rápido DC.

## 3.1 CHAdeMO

O protocolo de carregamento rápido DC de nome CHAdeMO foi criado por uma associação com o mesmo nome. O termo CHAdeMO é uma abreviatura para o nome *CHArge de MOve* que significa carga para movimento.

Como se expôs, a Nissan assume papel de destaque na associação, justificado pela aposta feita na produção de EV's por esta companhia, mas produtoras como a Toyota e a Mitsubishi também fizeram parte da sua fundação. A nível Europeu verificou-se o lançamento de alguns modelos com esta opção de carregamento por parte da Peugeot e da Citroen.

Na tentativa de forçar a entrada de carros elétricos no mercado, perspetivando o acesso a energia mais barata, a União Europeia financiou a instalação de muitas EVSE's deste tipo, baseando-se no seu potencial de carregar EV's num curto período de tempo.

Rapidamente os carregadores se distribuíram por todo o Mundo.

A figura 4 mostra a evolução do número de estações instaladas. Em Portugal existem cerca de 20.

### 3.1.1 Funcionamento do protocolo

O conector neste protocolo permite apenas o carregamento por DC, pelo que ao utilizar este num EV, será necessário um idêntico ao da figura 3.7 e outro que permita o carregamento AC.

Este carregamento, de momento, ocorre com uma corrente máxima de 125A, o que corresponde a uma potência de aproximadamente 62.5kW. De facto infraestruturas elétricas que permitam a entrega de mais energia, não são comuns por toda a rede. Todavia, o conector permite corrente até aos 200A, pelo que a evolução do protocolo aparenta ser simples.

As funcionalidades de cada pino do conector podem ser visualizadas na figura 3.8. Como se pode verificar, a comunicação é efetuada via CAN.

Neste tipo de carregamento o EV é que controla a corrente a ser entregue pela EVSE, comunicando-lhe esse valor ao longo do processo.

As principais características deste protocolo são:

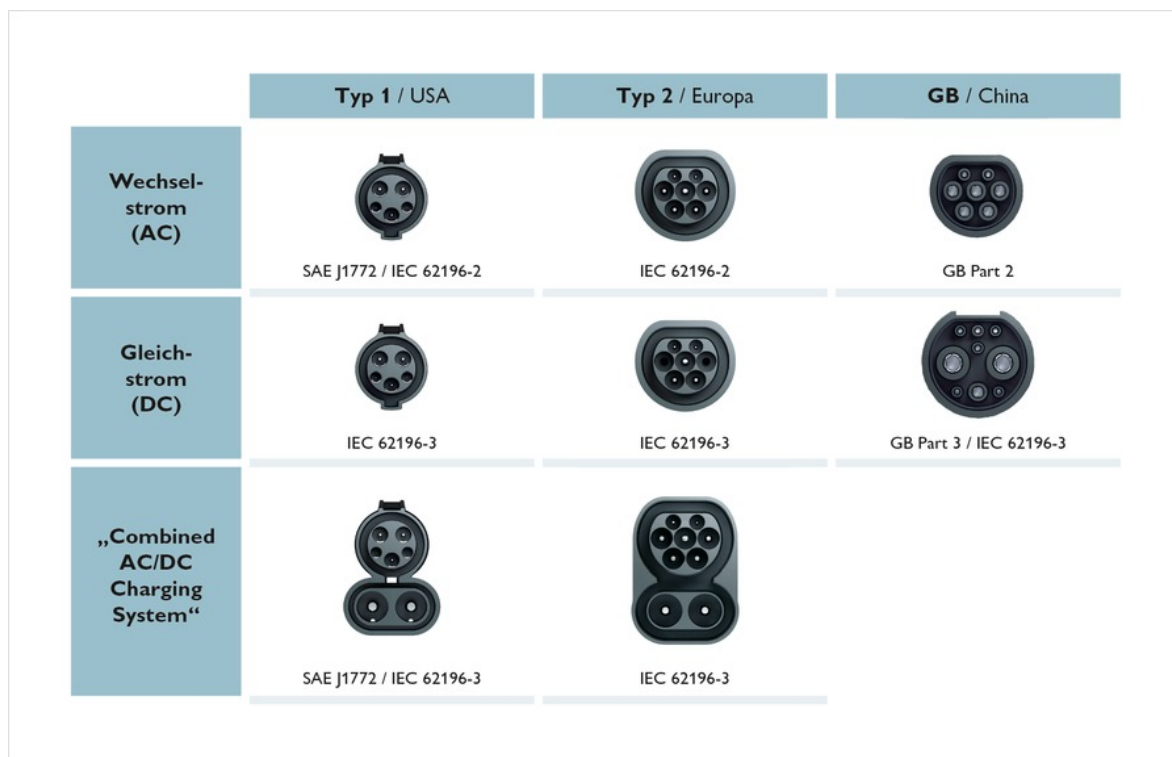


Figura 3.5: Conectores da norma 62916 s/ o conector da CHAdeMO [12].

- Compatibilidade com Redes Eléctricas Inteligentes - Apesar de ser uma funcionalidade adicionada recentemente, o protocolo e conectores CHAdeMO já permitem a comunicação entre a bateria e a rede eléctrica segundo o protocolo "V2H(Vehicle To Home)".
- Conector com Acoplação Mecânica - Permite que após o início do carregamento se assegure uma ligação entre o EV e a EVSE através de um fecho mecânico.
- Protecção Contra Choques Eléctricos - Utiliza do lado da EVSE um transformador de desacoplamento entre a entrada AC e a saída DC, o que faz com que o carregamento seja feito com recurso a uma terra virtual. Requer monitor de isolamento.

## 3.2 CCS

Este protocolo foi desenvolvido pela SAE, em conjunto com o IEC (61851), e surgiu na tentativa de uniformizar os conectores, permitindo para tal a utilização de um só, para carregamento AC e DC, como o próprio nome indica *Combined Charging System*, que se traduz por "Sistema de Carregamento Combinado".

É um protocolo relativamente recente, pelo que, existem poucas estações instaladas pelo Mundo.



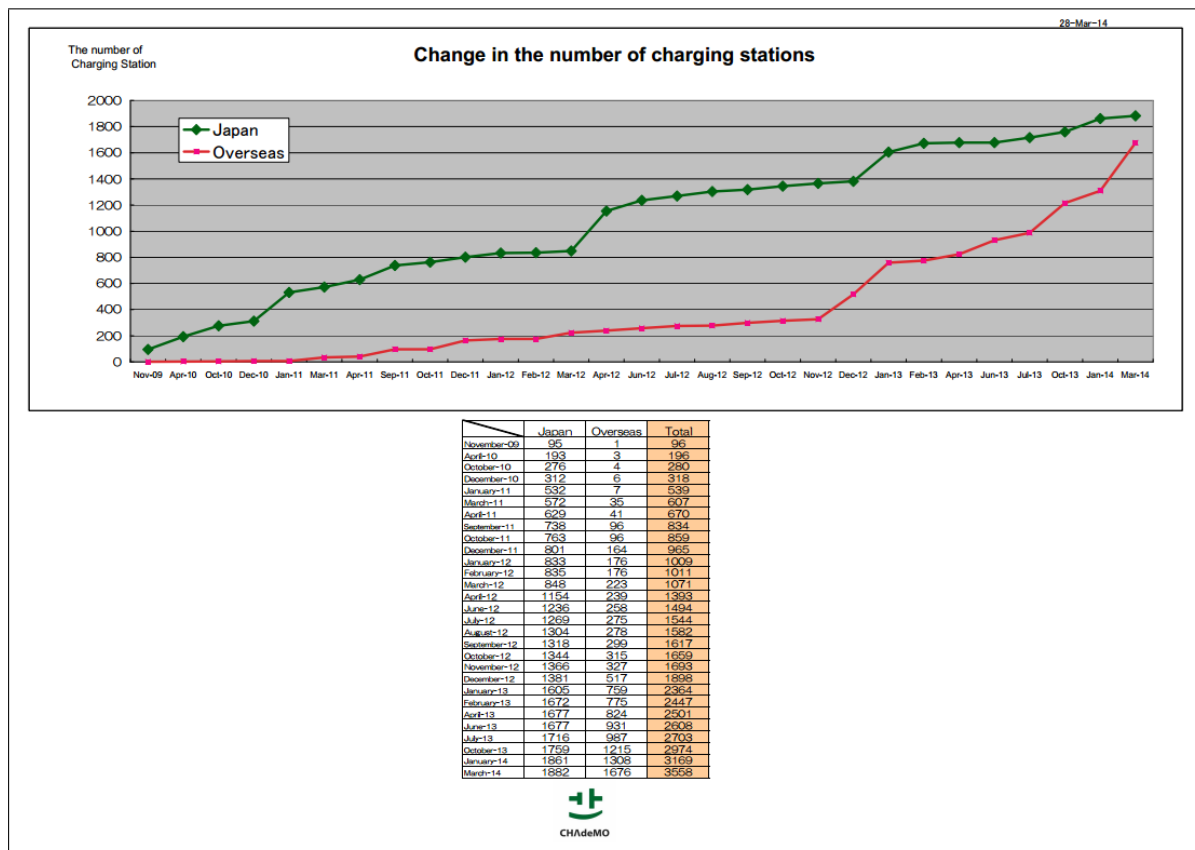


Figura 3.6: Evolução do número de estações de carregamento do tipo CHAdeMO [13].



Figura 3.7: Conector para carregador com o protocolo CHAdeMO [14].

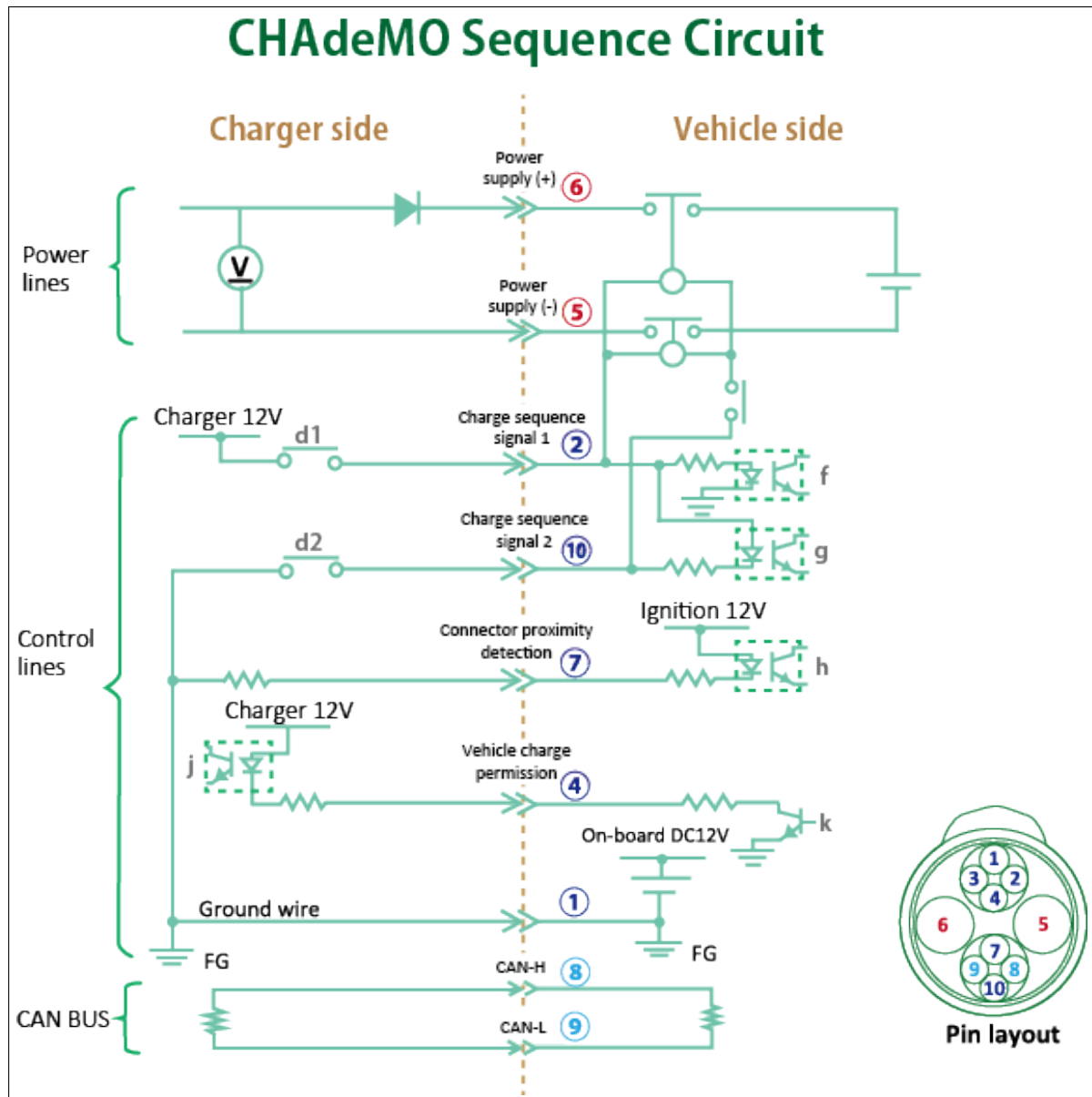


Figura 3.8: Circuito para carregamento no protocolo CHAdemo [14]

### 3.2.1 Funcionamento do Protocolo

Uma vez que o objetivo sempre foi uniformizar os conectores, o protocolo foi desenvolvido tendo por base as funcionalidades e pinos, já existentes para o carregamento do tipo AC. A figura 3.9 mostra o conector e os pinos, cujas funcionalidades são as seguintes:

- Proximity Pin (PP) - Assegura a conexão entre o EV e a EVSE;
- Control Pilot (CP) - Permite troca de informação através de um sistema PWM/DC para a comunicação EVSE  $\rightarrow$  EV, e a um sistema de resistência variável, para a comunicação EV  $\rightarrow$  EVSE (Modulação em amplitude);
- L1, L2, L3, Neutral - Fases e neutro, caso o carregamento se processe na forma trifásica. Apenas "L1" e "Neutral", caso seja na forma monofásica;
- Earth (PE) - Ligação física à terra.

Para processar o carregamento DC, sem recurso a pinos adicionais, como é necessária a troca de mais informação entre o EV e a EVSE, optou-se por utilizar um protocolo de comunicação por PLC nos pinos CP (com+) e PE (com-), o *HomePlug GreenPHY*, que permite a fácil integração do veículo numa rede elétrica inteligente.

Neste protocolo é também o EV que controla os valores de potencial e corrente, a utilizar no início e durante o carregamento. O valor máximo de potencial entregue por uma EVSE, está definido no standard para 600V e a máxima corrente para 400A, o que totaliza uma potência máxima de 240kWh [16].

Assim sendo, ao abrigo deste protocolo o carregamento AC e DC, pode ser processado nos conectores do standard 62916-2, bem como nos do 62916-3, figura 3.5. A principal diferença reside nos conectores do tipo 62916-3, por terem pinos dedicados para o carregamento DC, permitindo assim uma maior entrega de corrente durante o processo.

Como já foi referido, a comunicação ao nível mais baixo dá-se através de PWM/DC no sentido EVSE  $\rightarrow$  EV, e a um sistema de resistência variável, para a comunicação EV  $\rightarrow$  EVSE. Um circuito típico encontra-se esquematizado na figura 3.10. Este circuito de resistência variável, vai permitir que a comunicação entre a EVSE e o EV se processe com os estados apresentados na tabela 3.5. É de notar que a mudança entre os estados A, B, C e D, são causados pelo EV, enquanto que a alteração entre os estados 1 e 2 é provocada pela EVSE.

Para informar o EV sobre a corrente disponível, a EVSE e o EV comunicam através do duty-cycle do sinal PWM. A tabela 4.1 mostra os sinais fornecidos pela EVSE durante o carregamento.

Para o carregamento DC, tal como é especificado na tabela, a EVSE utiliza um duty-cycle de 5 %. A restante comunicação para informação e controlo é efetuada num nível superior, isto é, no mesmo pino mas por PLC.

Muitas outras informações estão disponíveis no protocolo em versão detalhada, nomeadamente questões de segurança. No entanto, estas são as essenciais no que toca ao seu funcionamento.



Figura 3.9: Conector Mennekes 62196-2 [15].

<i>Estado</i>	<i>Conexao fisica EV – EVSE</i>	<i>S3 Fig. 3.10</i>	<i>EV preparado para receber energia</i>	<i>EVSE preparada para fornecer energia</i>	<i>EVSE a fornecer energia</i>	<i>V<sub>EVSE</sub> Valor Máx.</i>	<i>V<sub>EVSE</sub> Valor Min.</i>	<i>Tipo de sinal V<sub>EVSE</sub></i>	<i>Notas</i>
<i>A1</i>	<i>Não</i>	<i>N/A</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>12V</i>	<i>N/A</i>	<i>DC</i>	<i>V<sub>EV</sub> = 0V</i>
<i>A2</i>	<i>Não</i>	<i>N/A</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>	<i>12V</i>	<i>-12V</i>	<i>PWM</i>	
<i>B1</i>	<i>Sim</i>	<i>Aberto</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>9V</i>	<i>N/A</i>	<i>DC</i>	<i>R<sub>T</sub> = 2.74kΩ</i>
<i>B2</i>	<i>Sim</i>	<i>Aberto</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>	<i>9V</i>	<i>-12V</i>	<i>PWM</i>	
<i>C1</i>	<i>Sim</i>	<i>Fechado</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>6V</i>	<i>N/A</i>	<i>DC</i>	<i>R<sub>T</sub> = 2.74kΩ  1.3kΩ; Ventilação não requerida</i>
<i>C2</i>	<i>Sim</i>	<i>Fechado</i>	<i>Sim</i>	<i>Sim</i>	<i>Sim</i>	<i>6V</i>	<i>-12V</i>	<i>PWM</i>	
<i>D1</i>	<i>Sim</i>	<i>Fechado</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>3V</i>	<i>N/A</i>	<i>DC</i>	<i>Substituindo R = 1.3kΩ por R = 270Ω. R<sub>T</sub> = 2.74kΩ  270Ω; Ventilação requerida</i>
<i>D2</i>	<i>Sim</i>	<i>Fechado</i>	<i>Sim</i>	<i>Sim</i>	<i>Sim</i>	<i>3V</i>	<i>-12V</i>	<i>PWM</i>	
<i>E</i>	<i>Sim</i>	<i>N/A</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>0V</i>		<i>DC</i>	<i>Problema com a EVSE ou com o sistema</i>
<i>F</i>	<i>Sim</i>	<i>N/A</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>N/A</i>	<i>-12V</i>		<i>EVSE não disponível</i>

Tabela 3.5: Estados do sistema -Comunicação no pino CP [19].

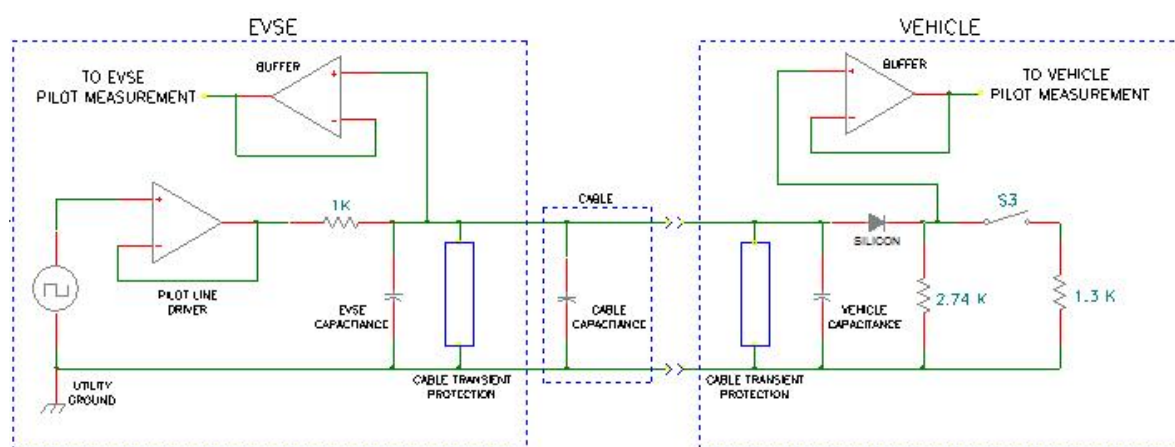


Figura 3.10: Circuito típico para pino de controlo [16].

"Duty Cycle" fornecido pela EVSE	Corrente disponível na linha
0% duty cycle	EVSE indisponível
5% duty cycle	Este "duty cycle" indica que comunicação digital, tem que ser estabelecida, entre o EV e a EVSE antes do carregamento; É este "duty cycle" que é utilizado durante o carregamento DC
$(\% \text{ duty cycle}) = \text{corrente}[A]/0.6$ $10\% \leq \% \text{ duty cycle} \leq 85\%$	6A a 51A
$(\% \text{ duty cycle}) = (\text{corrente}[A]/2.5) + 64$ $85\% \leq \% \text{ duty cycle} \leq 96\%$	6A a 51A
100% duty cycle	Corrente indisponível

Tabela 3.6: Especificações do carregamento de Ev's no modo 4 [18].





## Capítulo 4

# Baterias Elétricas

A bateria é um componente que transforma energia química, em energia elétrica. A primeira bateria terá sido criada por volta do ano de 1800, quando Alessandro Volta criou a "pilha de volta", que gerava uma corrente constante [28]. Desde então, muita evolução aconteceu nesta área.

As baterias encontram-se divididas em 2 grupos:

- Primárias - Baterias não recarregáveis.
- Secundárias - Baterias recarregáveis.

Este capítulo dedica-se ao estudo das baterias do tipo secundário, que são aquelas que perfazem os requisitos para a utilização em EV's. É de salientar que a diferença entre estes dois tipos de células, reside na sua composição química, que no caso das secundárias, permite que o processo químico associado à descarga seja reversível.

A associação de células em série ou paralelo na mesma unidade mecânica e elétrica, pode ser considerada como um módulo de uma bateria. Um aglomerado de módulos associados, resulta numa bateria com potencial e corrente ajustáveis (múltiplos do potencial e corrente de um módulo na forma singular), às especificações necessárias para alimentar um motor de EV.

Como se irá verificar ao longo deste capítulo, a utilização das células irá resultar sempre em algum desgaste. No entanto, quando recarregadas totalmente, estas têm que ser sempre consideradas com a carga ao máximo, i.e., a 100%. Assim sendo, para que o utilizador se aperceba do estado de carga real da bateria (caso seja necessário) uma medição com o nome de SOC, *State of Charge*, tem que ser implementada. Adicionalmente, com recurso ao SOC poderá ser implementado um algoritmo, para medir o SOH, *State of Health*, que indica o estado da bateria em comparação aos parâmetros apresentados pós-fábrica.

### 4.1 Células

Uma célula de bateria é o componente mais básico de qualquer sistema de energia portátil. O seu potencial é definido pelo material em que é fabricada, e pela respetiva eletroquímica associada (quimicamente o processo é chamado de oxidação/redução e está interligado ao fluxo de eletrões entre materiais). A sua capacidade energética, depende da sua construção e é medida em  $A.h$ . A quantidade nominal de  $A.h$ , que uma célula pode fornecer, é chamado

de parâmetro **C** e é definido pelo fabricante. Uma bateria pode ser composta por uma ou mais células, como apresentado na figura 4.1.

Essencialmente uma célula é composta de quatro componentes, como pode ser observado na figura 4.2. Abaixo descreve-se pormenorizadamente a função de cada um deles na situação em que o circuito se encontra fechado e conectado a uma carga. No processo de carregamento, a situação inverte-se entre o cátodo e o ânodo.

- *Positive Electrode*- Cátodo - É o eletrodo positivo. Recebe através do circuito externo pelo processo químico de redução, eletrões provenientes do ânodo.
- *Negative Electrode*- Ânodo - É o eletrodo negativo. Fornece eletrões à carga através do processo químico de oxidação.
- *Electrolyte*- Eletrólito - O eletrólito completa internamente o circuito, uma vez que é fabricado numa composição iónica, permitindo desta forma o fluxo de corrente entre o cátodo e o ânodo. A ionização do eletrólito tanto pode ser positiva como negativa (ácida ou alcalina, respetivamente) e o material utilizado para o efeito estar no estado líquido ou sólido.
- *Porous Separator*- Separador - A função do separador, tal como o nome indica, é de separar/isolar eletricamente os dois eletrodos. São utilizados de forma a reduzir o espaço necessário para a montagem de uma célula, sendo dispensáveis no caso de se garantir isolamento físico. É de notar que o contacto entre eletrodos provoca uma descarga imediata dos mesmos.

No resto deste subcapítulo analisam-se os principais tipo de células, disponíveis no mercado:

- **NiCd** - As células de *Nickel Cadmium* foram das primeiras a ser utilizadas para efeitos comerciais. Apesar da tecnologia já se encontrar bastante desenvolvida, estas células possuem pouca capacidade energética. São utilizadas por norma em sistemas que requerem baterias duradouras, baratas e de elevada capacidade de descarga. A sua construção recorre a metais tóxicos, tornando este tipo de células perigosas a nível ambiental.
- **NiMH** - Este tipo de células recorre ao *Nickel-Metal Hydride*. Tem propriedades elétricas idênticas às células de NiCd, no entanto, apresenta melhorias em termos de

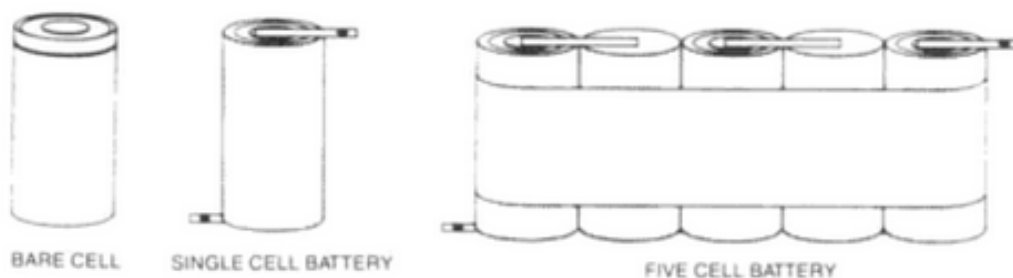


Figura 4.1: Célula e baterias de uma e de cinco células [1].

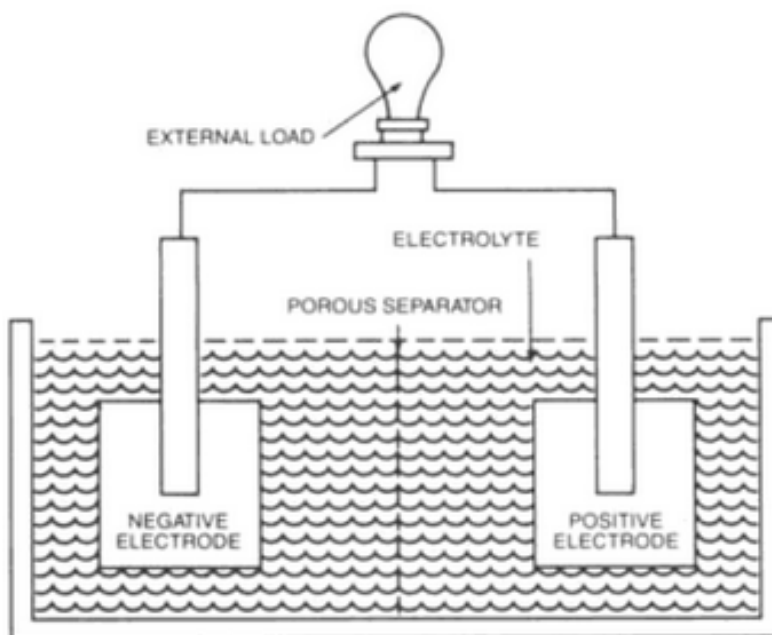


Figura 4.2: Estrutura básica de uma célula de bateria [1].

densidade energética, bem como ambientais, pelo facto de não conter materiais tóxicos na sua construção.

- **Chumbo-Ácido** - O tipo de células *Lead-Acid* é extremamente utilizado em equipamentos de potências elevadas, onde o peso não é considerado como sendo um fator determinante.
- **Iões de Lítio** - O *Lithium-Ion* é das tecnologias mais recentes apresentando as melhores características a nível de densidade energética.
- **Lítio-Polímero** - Idêntica à tecnologia Li-Ion, no entanto recorre a um eletrólito no estado sólido, o que pode ser indicado para certas utilizações.

Como já foi anteriormente referido, o potencial de cada célula depende da química dos elétrodos e pode ser calculado pela diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo. Para os materiais mais comuns, em condições normais, existem tabelas que referenciam estes potenciais 4.1. Poderá também ser necessário recorrer à equação de *Nernst* para o cálculo dos mesmos.

Para a escolha de um tipo de células a utilizar num EV, é essencial ter noção da densidade energética por peso e volume, que cada célula tipicamente apresenta. A figura 4.3 apresenta um diagrama elucidativo da situação.

#### 4.1.1 NiCd

A tecnologia que recorre a células de Nickel-Cadium é bastante robusta, podendo ser submetidas às mais diversas variações sem grandes consequências no seu funcionamento. É

<i>Cátodo (Redução) – "Half – Reaction"</i>	<i>Potencial Standard – <math>E^{\circ}</math>(volts)</i>
$Li^{+}(aq) + e^{-} \rightarrow Li(s)$	-3.04
$K^{+}(aq) + e^{-} \rightarrow K(s)$	-2.92
$Ca^{2+}(aq) + 2e^{-} \rightarrow Ca(s)$	-2.76
$Na^{+}(aq) + e^{-} \rightarrow Na(s)$	-2.71
$Zn^{2+}(aq) + 2e^{-} \rightarrow Zn(s)$	-0.76
$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$	0
$Cu^{2+}(aq) + 2e^{-} \rightarrow Cu(s)$	0.34
$O_3^{+}(g) + 2H^{+}(aq) + 2e^{-} \rightarrow O_2(g) + H_2O(l)$	2.07
$F_2(g) + 2e^{-} \rightarrow 2F^{-}(aq)$	2.87

Tabela 4.1: Lista de potenciais para possíveis elétrodos do cátodo [2].

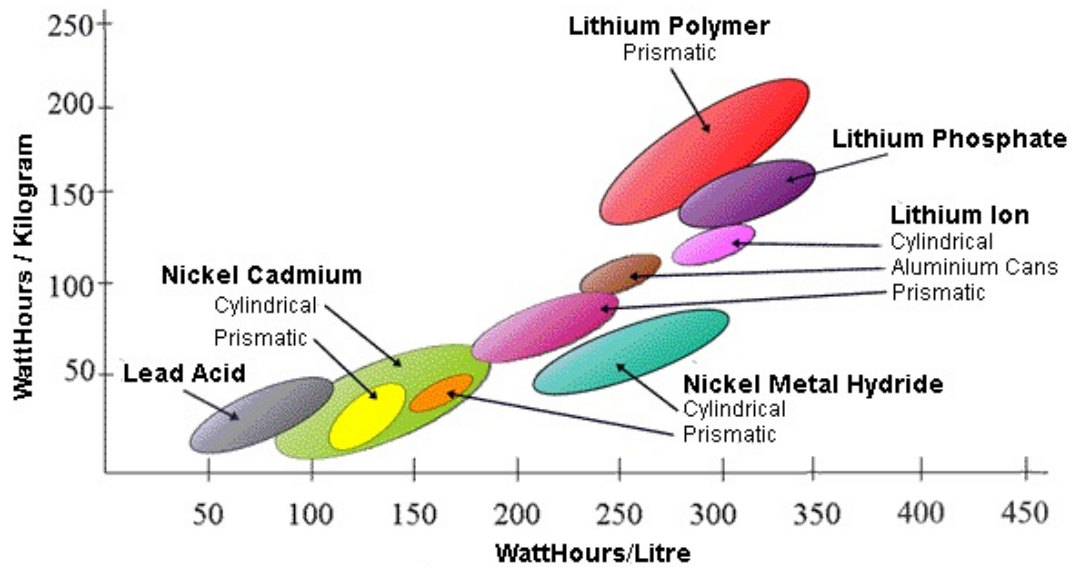


Figura 4.3: Densidades energéticas por peso e por volume de células recarregáveis tipicamente utilizadas [2].

dos poucos tipos de bateria em que a estimulação regular das células é um facto vantajoso. Aliás, uma regular descarga completa do sistema é tão importante, que caso não seja efetuada, os elétrodos irão acumular depósito que resultará num fenómeno conhecido como "memória", com a consequente e rápida degradação destes.

A figura 4.4 esquematiza uma bateria deste tipo.

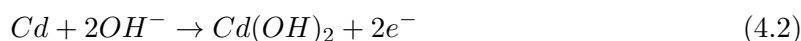
Os materiais utilizados, neste tipo de células, são indicados para o efeito uma vez que as reações químicas que acontecem nos elétrodos não deteriorizam o seu estado físico, podendo o processo de descarga ser revertido sem aparentes danos. É de notar a longevidade dos elétrodos devido ao seu bom grau de insolubilidade no eletrólito.

O eléctrodo carregado positivamente neste tipo de célula é composto de Óxido de Níquel Hidratado,  $NiOOH$ . Durante a descarga este é reduzido quimicamente para o seu estado de valência mais baixo, ao aceitar eletrões do circuito externo. Quimicamente, o processo anterior pode ser descrito como:



O processo de carga é inverso ao anterior.

O eléctrodo carregado de forma negativa neste tipo de células é composto de Cadim,  $Cd$ . No decorrer da descarga existe oxidação por parte deste, o que resulta num fluxo de eletrões no sentido do circuito externo. A reação química envolvida é:



A reação da rede que acontece no eletrólito durante a descarga, que no presente caso é o hidróxido de potássio,  $KOH$ , pode ser descrita por:



A lista que se segue enumera algumas das vantagens relacionadas com a utilização deste tipo de baterias[17]:

- Carregamento rápido e simples;
- Elevado número de ciclos de carregamento/descarga. Acima de 1000 se a manutenção for efectuada de forma correcta;
- Resistência interna baixa, que permite o carregamento a baixas temperaturas;
- Pode ser armazenada durante longos períodos em qualquer estado de carga;
- Fácil armazenamento e transporte. A maioria das companhias aéreas aceitam o seu transporte;
- Bom comportamento a baixas temperaturas;
- Podem ser submetidas a condições extremas de carga e descarga sem qualquer dano;
- Economicamente, é das tecnologias mais baratas em termos de custo por ciclo.

As principais desvantagens associadas a esta tecnologia são:

- Densidade energética baixa;

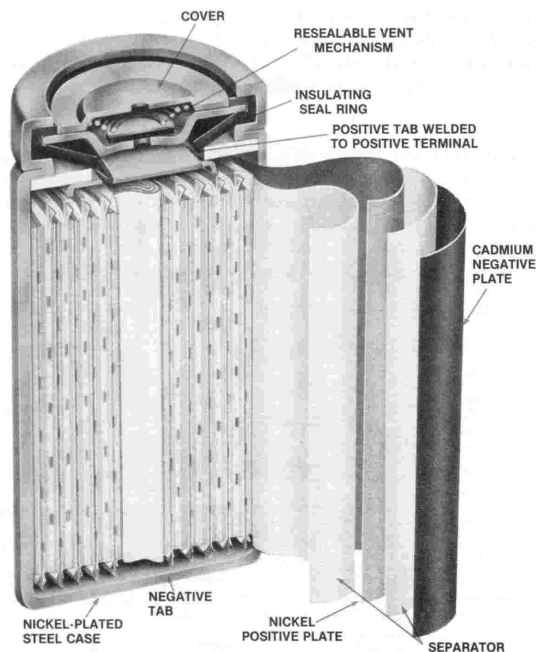


Figura 4.4: Estrutura básica de uma bateria cilíndrica de NiCd [3].

- Como já foi enunciado, tem efeito de memória se as células não forem totalmente descarregadas regularmente;
- Contém metais tóxicos que resultam em danos ambientais. Alguns Países já controlam a sua utilização;
- Descarrega-se de forma relativamente rápida, i.é., tem uma taxa de descarga própria alta.

A tabela 4.2 indica as suas principais características.

É uma tecnologia obsoleta devido à sua densidade energética, bem como ao perigo associado à utilização de Cádmio. As baterias de *NiMH* têm sido as utilizadas em seu detrimento.

#### 4.1.2 NiMH

As baterias de hidreto metálico de níquel, surgem nos anos 70 relacionadas com as investigações que tinham por finalidade identificar uma forma de guardar hidrogénio para as baterias de Nickel-Hidrogénio, utilizadas ainda agora na tecnologia espacial.

É uma tecnologia muito semelhante à das baterias de *NiCd* em que a principal diferença reside na composição química do ânodo, onde a presença do Cádmio foi substituída por uma liga de vários metais, absorventes de hidrogénio. O cátodo e o eletrólito continuam a ser fabricados na mesma composição química.

A figura 4.5, ilustra 2 baterias acopladas segundo esta tecnologia, na forma cilíndrica e prismática.

<i>Características</i>	<i>NiCd</i>
<i>Densidade energética por peso(Wh/Kg)</i>	45 – 80
<i>Resistência Interna c/ circuito de protecção(mΩ)</i>	100 – 200 (bat. 6V)
<i>Nº de ciclos de vida(Até 80% da sua capacidade inicial)</i>	1500
<i>Tolerância ao carregamento excessivo</i>	Moderada
<i>Taxa de descarregamento próprio por mês</i>	20%
<i>Voltagem nominal por célula</i>	1.25V
<i>Temperatura de funcionamento durante a descarga</i>	–40 até 60°C
<i>Manutenção requerida</i>	30 – 60 dias
<i>Corrente na célula – Melhor Resultado</i>	1C
<i>Corrente na célula – Pico</i>	20C
<i>Custo por bateria(USD) – 7.2V</i>	\$50
<i>Custo por ciclo(USD)</i>	\$0.04
<i>Comercializada em massa desde</i>	1950

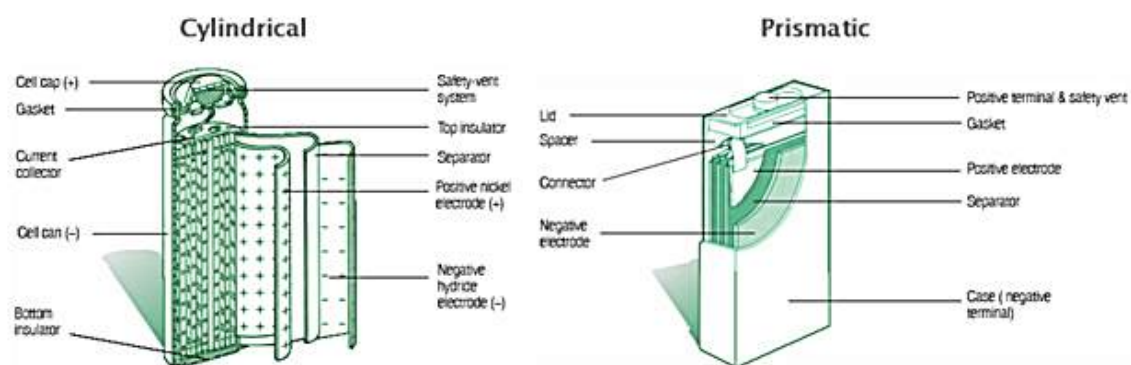
Tabela 4.2: Principais características das células de *NiCd* [17].

Figura 4.5: Estrutura básica de uma bateria cilíndrica/prismática de NiMH [4].

Durante a descarga, no eletrodo mais negativo, a reação química que ocorre pode ser descrita por:



No eletrodo mais positivo ocorre a reação apresentada para as células de *NiCd*.

As principais vantagens desta tecnologia são:

- Em comparação com as células de *NiCd*, estas têm cerca de 30 a 40 % a mais de capacidade;
- Menos susceptível ao efeito de memória. Porém, estas baterias também têm que ser "exercitadas", mesmo que menos vezes;
- Fácil transporte e armazenamento;
- Amiga do Ambiente. Podem ser recicladas.

E tem como principais desvantagens:

- Tempo de serviço limitado, principalmente se as baterias forem sujeitas a correntes muito elevadas;
- De forma a aumentar a sua duração, a sua descarga é limitada entre 0.2C e 0.5C.
- Requer mais tempo de carregamento do que a tecnologia *NiCd* e devido ao aumento de temperatura também necessita de um algoritmo mais complexo.
- Tem uma descarga própria bastante elevada, cerca de 50% mais, quando comparada à tecnologia anterior;
- As baterias têm que ser preferencialmente armazenadas num ambiente frio e com um SOC de cerca de 40%;
- É necessário uma regular descarga total das células, para evitar o efeito de memória;
- São economicamente mais dispendiosas do que as anteriores.

As principais características desta tecnologia encontram-se referenciadas na tabela 4.3.

Sendo este tipo de células de composição idêntica às de *NiCd*, mas com melhores características, é natural que a sua utilização tenha aumentado, em prejuízo das anteriores. O fabrico deste tipo de baterias tem vindo a decrescer com a evolução feita ao nível das células de Li-Ion.

#### 4.1.3 Chumbo-Ácido

A invenção das baterias de chumbo-ácido data de 1859, por Gaston Planté. No ano de 1881, Camille Faure inventou o modelo ainda hoje utilizado, que se encontra esquematizado na figura 4.6 e que recorre a ligas de chumbo para os eletrodos e a uma mistura de água com ácido-sulfúrico como eletrólito, "FLA(Flooded Lead-Acid)".

A sua robustez, que permite uma corrente de pico muito alta, associada ao seu preço, fez com que esta tecnologia seja a utilizada na maior parte dos sistemas de "SLI(Starting,



<i>Características</i>	<i>NiMH</i>
<i>Densidade energética por peso(Wh/Kg)</i>	60 – 120
<i>Resistência Interna c/ circuito de protecção(mΩ)</i>	200 – 300 (bat. 6V)
<i>Nº de ciclos de vida(Até 80% da sua capacidade inicial)</i>	300 – 500
<i>Tolerância ao carregamento excessivo</i>	<i>Baixa</i>
<i>Taxa de descarregamento próprio por mês</i>	30%
<i>Voltagem nominal por célula</i>	1.25V
<i>Temperatura de funcionamento durante a descarga</i>	–20 até 60°C
<i>Manutenção requerida</i>	60 – 90 dias
<i>Custo por bateria(USD) – 7.2V</i>	\$60
<i>Corrente na célula – Melhor Resultado</i>	0.5C ou menos
<i>Corrente na célula – Pico</i>	5C
<i>Custo por ciclo(USD)</i>	\$0.12
<i>Comercializada em massa desde</i>	1990

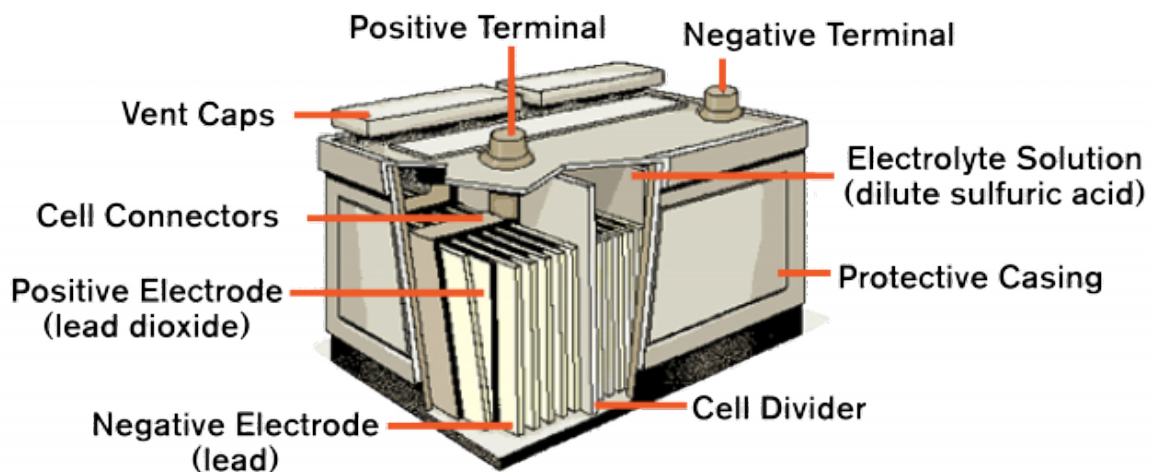
Tabela 4.3: Principais características das células de *NiMH* [17].

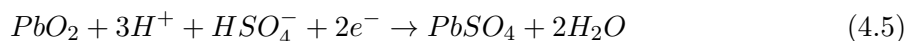
Figura 4.6: Estrutura básica de uma bateria de chumbo-ácido [5].

Lightning, Ignition)”, encontrados em todos os veículos. Como é do conhecimento geral, este tipo de tecnologia requer a adição de água periodicamente. É de salientar a fraca prestação desta tecnologia quando utilizada com cargas variáveis ou se sujeita a ciclos de descarga muito longos.

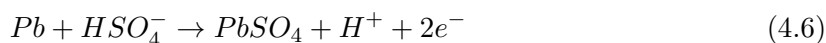
Por volta dos anos 70 foi criada uma nova tecnologia baseada nas baterias apresentadas anteriormente, à qual foi atribuída a designação de ”VRLA(Valve Regulated Lead-Acid)”, também conhecida por ”SLA(Sealed Lead-Acid)”, que veio introduzir no mercado um tipo de baterias com todas as propriedades elétricas do chumbo-ácido. Acresce ao referido que esta bateria é do tipo selada, o que facilita o seu manuseamento e instalação.

A nível do processo químico, nos eléctrodos as tecnologias são idênticas, no entanto, as baterias seladas aquando da carga recorrem a um processo de recombinação, que pode ir até aos 99%, ao contrário das baterias do tipo não-seladas que apenas podem sofrer no máximo uma recombinação na ordem dos 30%.

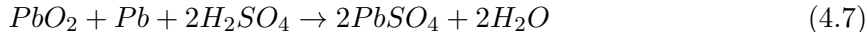
Quimicamente, no eléctrodo positivo, o processo que se dá aquando da descarga para qualquer uma das tecnologias, é o seguinte:



E no eléctrodo negativo:



O que para a célula toda resulta em:



A grande diferença entre tecnologias, reside então no processo de carregamento. Quando as baterias do tipo FLA entram em sobrecarga, o processo químico liberta gases, que na prática resultam numa redução da quantidade de água, por evaporação, presente no eletrólito. O funcionamento das baterias do tipo SLA consiste no aproveitar dos gases libertos, com recurso a um eletrólito gelatinoso.

No presente caso de estudo, a tecnologia de maior importância é evidentemente a SLA. As suas principais vantagens são:

- Baixo custo e simples construção, sendo as SLA as mais baratas em termos de custo por Watt;
- Tecnologia bastante estudada e experimentada. Se corretamente utilizada apresenta um período de vida bastante longo;
- Baixa taxa de descarregamento próprio. Aliás, a mais baixa de todas as tecnologias;
- É necessária pouca manutenção- não produz efeito de memória;
- Capacidade de fornecer uma corrente de pico bastante elevada.

As limitações associadas a esta tecnologia são essencialmente:

- As baterias deste tipo não podem ser guardadas descarregadas;
- Têm uma densidade energética muito baixa;

- Permitem um número limitado de descargas totais. i.é., são indicadas para sistemas "standby", que apenas necessitem de descargas totais esporadicamente;
- Pode causar danos ambientais. Tanto o chumbo nos elétrodos como o ácido no eletrólito;
- Se carregada de forma imprópria, pode levar a uma situação descontrolada de aumento de temperatura.

As principais características que definem esta tecnologia encontram-se na tabela 4.4

<i>Características</i>	<i>Chumbo – Ácido</i>
<i>Densidade energética por peso(Wh/Kg)</i>	30 – 50
<i>Resistência Interna c/ circuito de protecção(mΩ)</i>	< 100 (bat. 12V)
<i>Nº de ciclos de vida(Até 80% da sua capacidade inicial)</i>	200 – 300
<i>Tolerância ao carregamento excessivo</i>	Alta
<i>Taxa de descarregamento próprio por mês</i>	5%
<i>Voltagem nominal por célula</i>	2.00V
<i>Temperatura de funcionamento durante a descarga</i>	–20 até 60°C
<i>Manutenção requerida</i>	3 – 6 meses
<i>Custo por bateria(USD) – 6V</i>	\$25
<i>Corrente na célula – Melhor Resultado</i>	0.2C
<i>Corrente na célula – Pico</i>	5C
<i>Custo por ciclo(USD)</i>	\$0.10
<i>Comercializada em massa desde</i>	1970

Tabela 4.4: Principais características das células de *chumbo – ácido* [17].

#### 4.1.4 Iões de Lítio

As baterias de Lítio surgiram numa primeira fase por volta do ano de 1912, mas só nos anos 70 foi criada a primeira bateria com fins comerciais, recorrendo a esta tecnologia, sendo esta do tipo não recarregável. Devido á instabilidade do Lítio enquanto metal, durante o processo de carga, esta tecnologia só se tornou viável, quando em 1991 a "Sony Corporation" introduziu no mercado uma bateria tendo por base de construção, os iões de Lítio.

A figura 4.7 esquematiza uma célula típica de iões de lítio. A referência da mesma é 18650, o que corresponde às suas dimensões físicas. Salienta-se que este tipo de células é o que apresenta um melhor rácio custo/densidade energética dentro desta tecnologia. Face à sua facilidade de acondicionamento, as baterias do tipo prismáticas também são muito comuns.

Uma vez que o Lítio é o metal mais leve, é natural que estas baterias apresentem uma excelente performance, no que toca à sua densidade energética, sendo por isso a maior parte dos dispositivos móveis equipados com as mesmas.

Muita investigação e evolução foi feita nesta tecnologia, apresentando-se nos dias de hoje em franca expansão. As principais células construídas, tendo por base a mesma, têm diferenças substanciais. Ao nível do ânodo a investigação tem recaído essencialmente sobre várias formas de carbono, nomeadamente a Grafite e outros contendo hidrogénio. Ao nível do cátodo, três tipos de óxidos de transição andam a ser estudados, nomeadamente o cobalto, o níquel e o manganês.

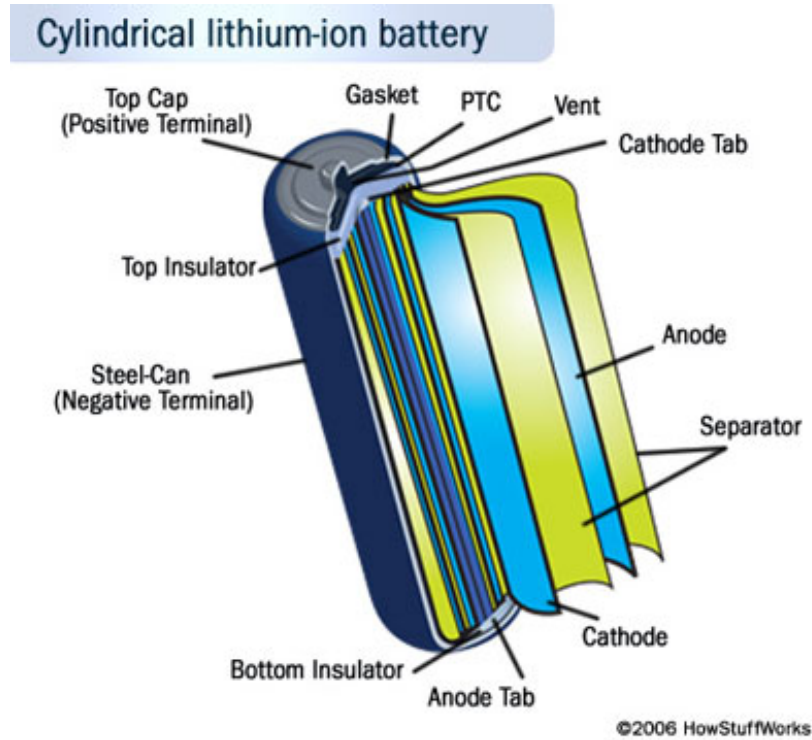
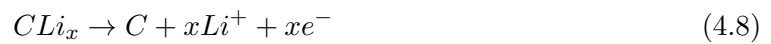


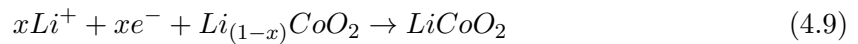
Figura 4.7: Estrutura básica de uma bateria de íons de Lítio- 18650 [6].

É de notar, que as células de lítio-ion, que recorrem a eletrólitos líquidos (p. ex. Hexafluorofosfato de lítio combinado com um solvente), são potencialmente explosivas, pois são construídas com encapsulamento pressurizado e eletrólito inflamável.

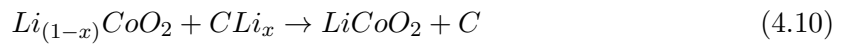
A reação química que acontece ao nível do ânodo, durante a descarga, pode ser representada por:



A que sucede ao nível do cátodo quando se recorre ao cobalto, é a seguinte:



A reação total ao nível da célula é então:



Esta tecnologia apresenta como principais vantagens:

- Elevada densidade energética, com potencial de crescimento;
- Baixa taxa de descarregamento próprio. Cerca de metade das células de NiCd e de NiMH;
- Pouca manutenção. Não necessita de descargas periódicas e não tem efeito de memória.

E como principais desvantagens:

- Requer circuito de proteção, para limitação da voltagem e corrente;
- Está sujeita a envelhecimento (perda de capacidade), quando se encontra armazenada. Em condições específicas, em ambientes frios e/ou 40% de SOC, pode-se diminuir a influência deste factor;
- Corrente de descarga moderada;
- Sujeita a regulamentos aquando do seu transporte em grandes quantidades;
- A sua construção é dispendiosa. Algumas alterações na composição química prometem vir a diminuir o seu preço;
- Tecnologia ainda em desenvolvimento.

Com a descoberta de sólidos não metálicos, capazes de conduzir iões, um novo tipo de células com propriedades idênticas foi criado, as de lítio-polímero, figura 4.1.5. Uma análise mais detalhada será efetuada no próximo subcapítulo.

As características comuns a cada tecnologia encontram-se na tabela 4.5.

<i>Características</i>	<i>Iões de lítio</i>	<i>Lítio – Polímero</i>
<i>Densidade energética por peso(Wh/Kg)</i>	110 – 160	100 – 130
<i>Resistência Interna com circuito de protecção(mΩ)</i>	150 – 250 (bat. 7.2V)	200 – 300 (bat. 7.2V)
<i>Número de ciclos de vida (Até 80% da sua capacidade inicial)</i>	500 – 1000	300 – 500
<i>Tolerância ao carregamento excessivo</i>	<i>Muito Baixa</i>	<i>Baixa</i>
<i>Taxa de descarregamento próprio por mês</i>	10%	10%
<i>Voltagem nominal por célula</i>	3.60V	3.60V
<i>Temperatura de funcionamento durante a descarga</i>	–20 até 60°C	0 até 65°C
<i>Manutenção requerida</i>	<i>Não Req.</i>	<i>Não Req.</i>
<i>Corrente na célula – Melhor Resultado</i>	1C ou menos	1C ou menos
<i>Corrente na célula – Pico</i>	> 2C	> 2C
<i>Custo por bateria(USD) – 7.2V</i>	\$100	\$100
<i>Custo por ciclo(USD)</i>	\$0.14	\$0.29
<i>Comercializada em massa desde</i>	1991	1999

Tabela 4.5: Principais características das células de lítio recarregáveis [17].

#### 4.1.5 Lítio-Polímero

As baterias de lítio-polímero são uma vertente da tecnologia, baseada em lítio, criada nos anos 70, que apresenta como grande vantagem do ponto de vista físico, o recurso a um polímero sólido como eletrólito. Para a utilização num EV, esta característica é de grande

importância, uma vez que permite aos fabricantes utilizar baterias que em caso de acidente revelam-se mais seguras. O eletrólito também permite do ponto de vista da construção, implementar baterias de todas as formas geométricas e tamanhos, uma vez que cada célula pode ter cerca de 1mm de espessura.

A figura 4.8 esquematiza uma bateria construída segundo esta tecnologia.

Infelizmente, problemas associados à cinética dos elétrodos, i. e., à capacidade para fazer fluir os iões de lítio, faz com que estas células tenham menos capacidade energética do que as de iões de lítio e um ciclo de vida mais limitado. A fim de colmatar o problema anterior, é utilizado um gel que permite um maior fluxo de iões entre os elétrodos. Ficando assim uma das boas propriedades desta tecnologia bastante reduzida.

As composições do cátodo e do ânodo, bem como as reações químicas nas células, são idênticas às já apresentadas no subcapítulo 4.1.4.

A lista seguinte indica as vantagens principais deste tipo de baterias:

- Podem ser construídas de forma extremamente fina, com a espessura de um cartão de crédito;
- Formato flexível;
- São extremamente leves;
- Têm mais segurança do que na tecnologia de iões de lítio. São mais resistentes á sobrecarga e a possibilidade de derramar eletrólito é substancialmente mais reduzida, por recorrer a um gel.

As suas principais desvantagens são:

- Têm menos densidade energética do que as baterias de iões de lítio, no entanto existe um significativo potencial de desenvolvimento;
- São de fabrico dispendioso.

A tabela 4.5 também enumera as principais características desta tecnologia.

## 4.2 Sistema de Gestão -BMS

Como anteriormente referido, as células de bateria têm propriedades potencialmente perigosas, quando sujeitas a condições extremas. Pelo que, o seu carregamento tem que ser feito com recurso a carregadores específicos.

Daí, por forma a controlar as células de uma maneira pormenorizada, ao longo do seu tempo de vida, baterias do tipo "inteligente" foram criadas. Estas recorrem a um sistema eletrónico para o efeito. A figura 4.9 mostra os blocos tipicamente utilizados numa bateria deste tipo.

A sua utilização tem 3 principais finalidades:

- Protecção das células/bateria;
- Aumentar o tempo de vida da bateria;

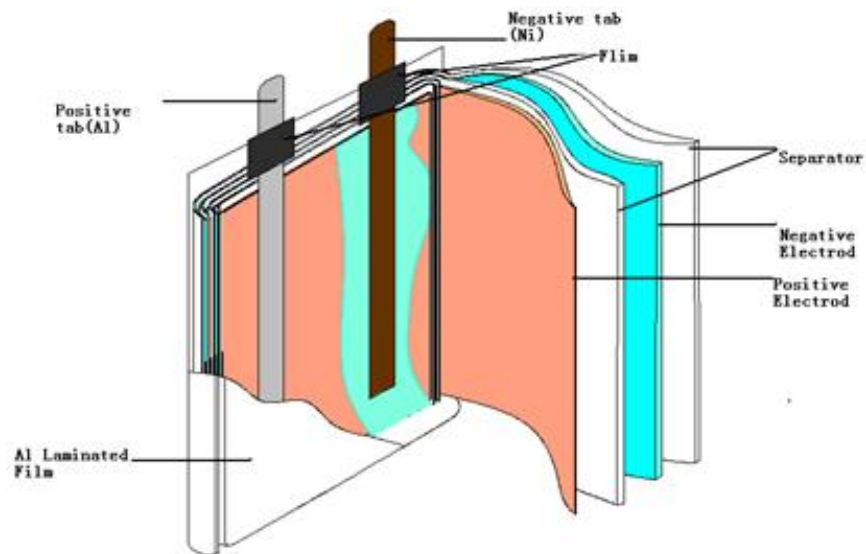


Figura 4.8: Estrutura básica de uma bateria de lítio-polímero [7].

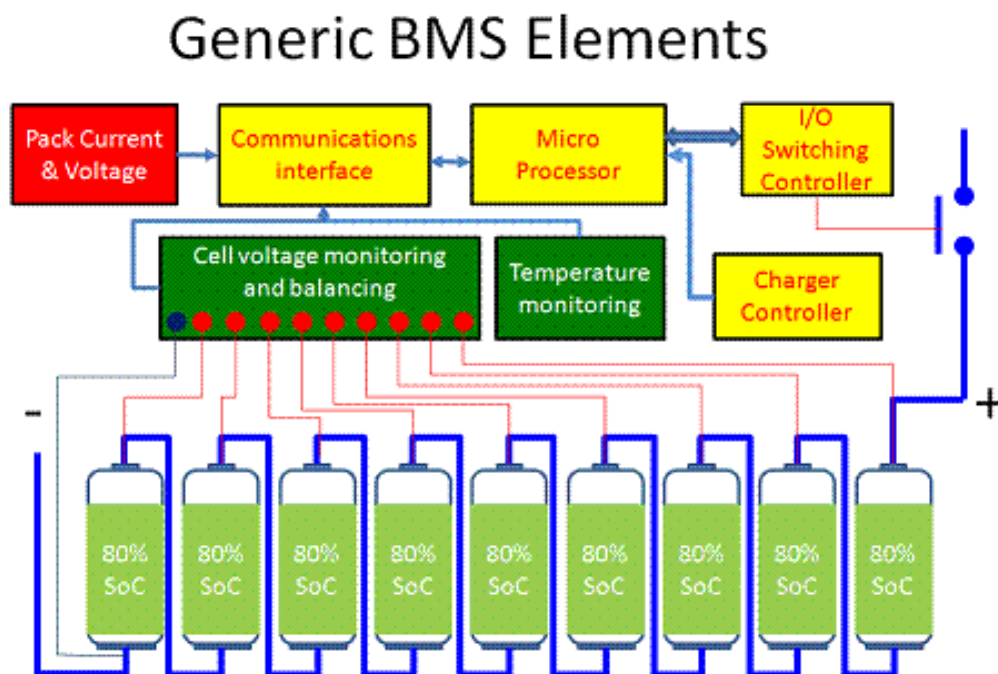


Figura 4.9: Estrutura básica de uma sistema de gestão de uma bateria [8].

- Manter a bateria num estado em que possa cumprir as funcionalidades para que foi concebida.

De forma a atingir os objetivos anteriores, o módulo de gestão poderá ter as seguintes funcionalidades:

- **Monitorizar** - Manter um registo e/ou transmitir informação sobre certas características da bateria, nomeadamente:
  - Potencial - Dependendo do sistema, pode ser implementado de forma a controlar o potencial em cada célula, ou o potencial total do módulo, ou os potenciais máximo e mínimo de cada célula, etc.;
  - Temperatura - Poderá ter informação sobre a temperatura média da bateria, ou sobre a de cada célula;
  - SOC ou "DOD(Depth Of Discharge)-Para indicar o nível de carga na bateria;
  - State Of Health (SOH) - Define a condição geral da bateria;
  - Corrente - Quantificar a corrente que entra ou sai da bateria;
- **Proteger** - Manter a bateria a funcionar dentro dos limites seguros, tais como:
  - Corrente;
  - Potencial durante o carregamento;
  - Potencial durante a fase de descarga;
  - Temperatura excessiva;
  - Pressão, no caso das baterias de *NiMH*.
- **Comunicar** - Comunicar os limites ao sistema em que está a ser utilizada, durante a descarga, e as suas características ao carregador, durante o carregamento. Tipicamente é utilizado um destes sistemas de comunicação:
  - Comunicação série- Uma das soluções mais utilizadas recorre ao protocolo "CAN(Controller Area Network)";
  - Comunicação sem fios;
  - DC-BUS- Comunicação via *Power Line Communication*.
- **Optimizar** - Utilizar um micro-controlador para controlar todo o sistema. Nomeadamente:
  - Calcular os valores máximos de corrente de carga e descarga;
  - Balancear as células;
  - Manter informação sobre a vida das células.

Para a construção de uma bateria de alto potencial, como é o caso necessário para os EV's, existem duas topologias mais comuns. A figura 4.10 mostra o esquema de uma topologia em estrela, enquanto na figura 4.11 encontra-se o esquema de uma topologia em anel.



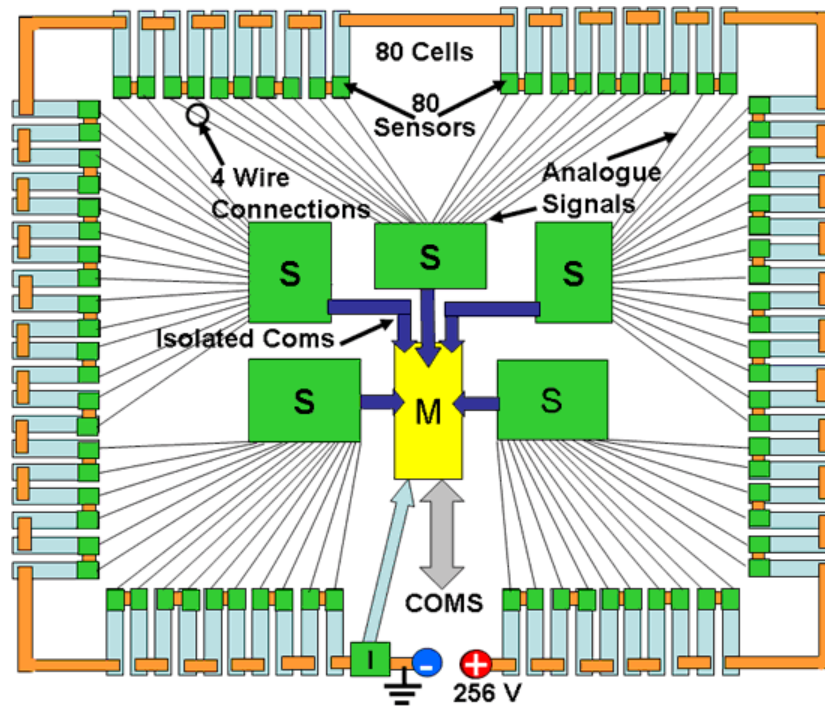


Figura 4.10: Bateria de alto potencial, -Topologia em estrela [2].

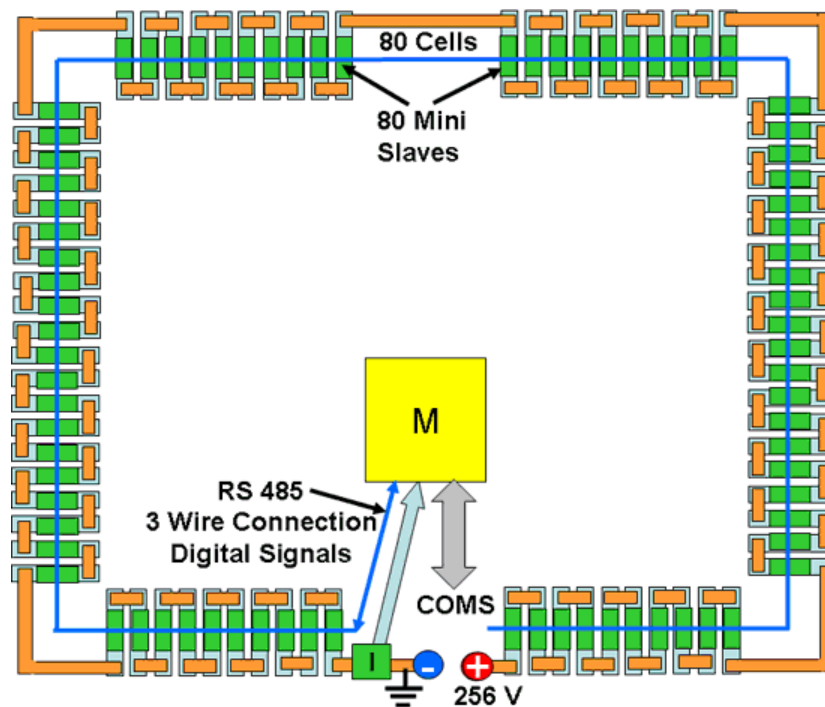


Figura 4.11: Bateria de alto potencial, -Topologia em anel [2].

### 4.2.1 Equalização de células

Um problema associado à utilização de grandes sequências de células, está relacionado com a construção das mesmas. Uma vez que nenhuma célula é igual, nem está sujeita às mesmas condições, um sistema de várias células será naturalmente não balanceado, pelo que a sua robustez será sempre inferior a uma bateria de uma célula.

Por forma a minimizar o impacto do problema anterior, várias soluções foram criadas, com vista a equalizar o sistema durante ou após o carregamento. As principais são:

- **Equalização ativa** - Este método de equalização utiliza a carga nas células mais carregadas, para se equilibrar com as células menos carregadas.
  - **Equalização *shunt* ou *cell-to-cell*** - O sistema é equalizado durante o carregamento. Estipula-se o potencial máximo, e quando uma célula atinge esse limite, cria um caminho de baixa resistência em paralelo, para que a corrente flua apenas nas células que ainda não atingiram esse mesmo valor limite.
  - **Equalização limitando o carregamento** - Esta forma de equalização é a mais simples, no entanto é a mais arcaica. Funciona desligando todo o sistema de carregamento, quando uma das células atinge o limite de potencial estipulado, ou o sistema de descarregamento, quando uma das células atinge o mínimo.

A figura 4.12 esquematiza outros tipos de topologia comuns.

- **Equalização passiva** - Utiliza uma carga para dissipar a energia em excesso nas células, até se atingir o equilíbrio do sistema.

### 4.2.2 Estado de Carregamento -SOC

O SOC e o DOD são medidas na forma percentual, que têm como finalidade informar o utilizador, ou o sistema, da carga ainda disponível para entrega numa bateria. Funcionalmente, têm o mesmo efeito que o medidor de combustível presente nas viaturas.

De forma geral, o SOC, pode ser definido como o rácio entre a capacidade disponível na bateria,  $Q(t)$ , e a capacidade nominal desta,  $Q_n$ , que é fornecida pelo fabricante das células [29]. Matematicamente, pode ser definido como:

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} \quad (4.11)$$

Pelo que, aparentemente, um bom conhecimento da corrente, que flui na bateria, seria suficiente para um bom cálculo deste. No entanto, para além de ter que existir uma monitorização constante desta, as variações de temperatura, o desgaste da bateria e outros fatores vão influenciar para que a sua precisão fique á quem do desejável.

De seguida apresentam-se algumas soluções para medir o SOC:

- **Medição Directa** - O SOC é estimado através da medição de certas propriedades elétricas da bateria.
  - **Medição do potencial em circuito aberto ("OCV(Open Circuit Voltage)")** - Dependendo do tipo de bateria, esta pode ser uma boa aproximação,

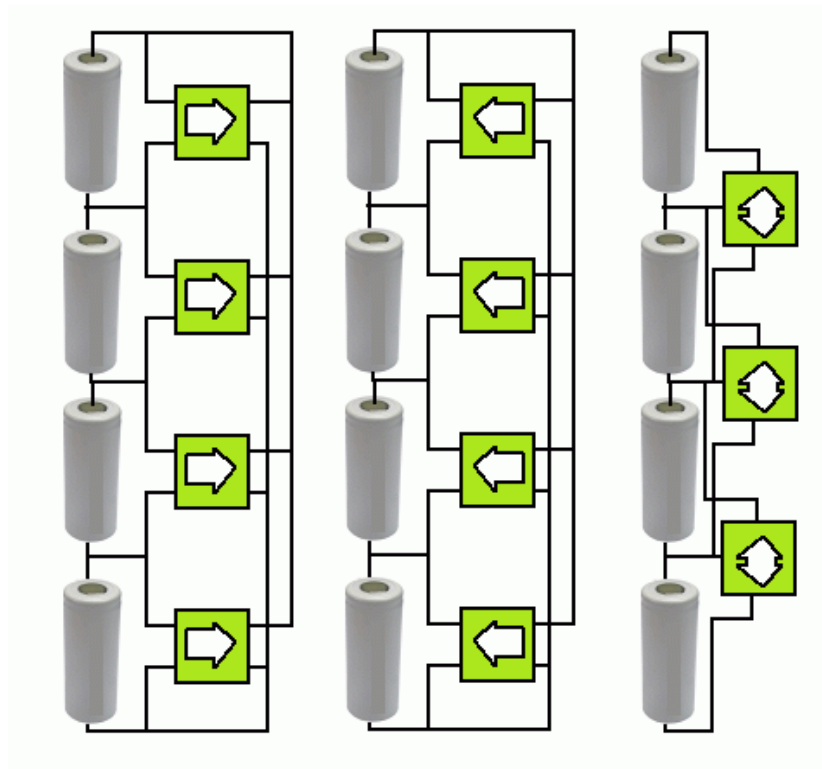


Figura 4.12: Topologias para equalização ativa de baterias. *cell-to-bat*; *bat-to-cell*; *cell-to-cell* [9]

desde que a relação entre a SOC e OCV seja linear, como acontece na tecnologia chumbo-ácido. Nas baterias que recorrem ao lítio, esta propriedade já não se verifica.

Matematicamente, considerando os limites de potencial  $a_0 \rightarrow SOC = 0\%$  e  $a_1 \rightarrow SOC = 100\%$  a seguinte aproximação é válida e relativamente robusta:

$$V_{OC} = a_1 * SOC(t) + a_0 \quad (4.12)$$

- **Medição do potencial durante a descarga** - De forma idêntica ao método anterior, também utiliza o potencial, neste caso durante a descarga, para estimar de forma linear o SOC da bateria. No início e no fim da descarga, este método apresenta muito erro, devido às não linearidades do processo.
- **Medição da impedância** - Relaciona o SOC com a impedância da bateria. Como todas as células apresentam características ligeiramente diferentes, este método requer muitos testes para que seja eficaz.
- **Medição da impedância através de espectroscopia** - Este método utiliza a medição da impedância da bateria, numa gama de frequências AC a diferentes valores de carga e descarga, relacionando-os com tabelas previamente criadas.
- **Estimação recorrendo à medição da corrente** - Utiliza valores da corrente de descarga da bateria, para estimar o SOC. Este método já consegue atenuar o efeito de alguns fatores, que sofrem alterações ao longo do tempo de vida da bateria.
- **Contagem de Coulomb** - Este método de estimação recorre à medição da corrente na bateria, durante a carga e descarga,  $I(t)$  e à sua integração no tempo, para fazer a respetiva estimativa do SOC. Matematicamente este método pode ser descrito por:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{I(t)}{Q_n} * \Delta t \quad (4.13)$$

Apesar de ser mais preciso, este método ainda é muito influenciado pelas alterações a que a bateria está sujeita, assim o erro da medição pode ser superior a 10%.

- **Contagem de Coulomb Modificada** - Baseia-se num modelo que corrige a corrente obtida, através da contagem de Coulomb. Isto é, utiliza uma relação quadrática de três parâmetros, para aproximar com menos erro o SOC. Estes podem ser obtidos recorrendo a alguns testes práticos.

Assim sendo, a corrente corrigida pode ser matematicamente expressa por:

$$I_c(t) = k_2 I(t)^2 + k_1 I(t) + k_0 \quad (4.14)$$

O SOC pode então ser calculado através da seguinte fórmula:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{I_c(t)}{Q_n} * \Delta t \quad (4.15)$$

Este método apresenta cerca de metade do erro quando comparado com o anterior.

- **Estimação recorrendo a sistemas adaptativos** - A estimação do SOC tem vindo a beneficiar de melhorias com a evolução associada à inteligência artificial. Estes sistemas do tipo adaptativo, recorrem ao historial recente das medições, para se ajustarem ao SOC real da bateria.

Algumas das formas mais utilizadas são:

- Redes neurais artificiais (RNA's) com retropropagação;
  - Redes neurais artificiais (RNA's) de função de base radial (RBF);
  - Estimação baseada em *fuzzy logic* -lógica difusa;
  - Estimação utilizando uma máquina de vetores de suporte (SVM);
  - RNA's difusas;
  - Estimação utilizando o filtro de Kalman.
- **Estimação recorrendo a métodos híbridos** - Utiliza por norma o melhor de dois métodos para fazer estimativas, que podem ser de erro inferior a um ponto percentual (sem necessitar de implementações do tipo RNA).

As combinações mais utilizadas são:

- **Contagem de Coulomb e medição do potencial** - Já existem algoritmos com fator de envelhecimento, que quando considerado, melhora bastante a estimativa;
- **Contagem de Coulomb e filtro de Kalman.**

### 4.2.3 Comunicação

Conforme se referiu, a comunicação numa bateria inteligente é de extrema importância. A sua utilização vai tornar a bateria muito mais robusta do ponto de vista operacional, tanto no processo de carregamento como quando sujeita a uma carga.

Dependendo da configuração pretendida, bem como da microeletrónica disponível, um protocolo de comunicação pode ser implementado. Maioritariamente, este tipo de protocolos, utilizam para barramento, pelo menos 2 fios dedicados à comunicação.

Para uma comunicação do tipo série, em que os bits se encontram multiplexados no tempo, i.é, em que são sequencialmente enviados, existem protocolos de comunicação bastante conhecidos, dos quais se destacam o *I2C*, o *SPI* e o *CAN*.

Por norma, em veículos, o protocolo de barramento que é muito utilizado devido à sua robustez, é o protocolo CAN. Tem como principal vantagem ser uma arquitectura multi-master, relativamente aos outros 2, que são do tipo *master-slave*.

Por forma a não utilizar mais linhas para implementar a comunicação, um protocolo do tipo DC-BUS pode ser utilizado. Este, através de PLC, troca a informação pelas linhas de alimentação da bateria.

Assim sendo, pode ser escolhido um protocolo de troca de dados série, fazendo o fluxo de informação na camada física via PLC. Para o efeito, uma implementação típica, utiliza o sistema de comunicação via UART.

A figura 4.13, esquematiza um circuito básico deste tipo. É de notar que a baixas taxas de transmissão existe um potencial de comunicação a centenas de metros de distância, enquanto que a altas frequências, o mesmo já não se verifica.

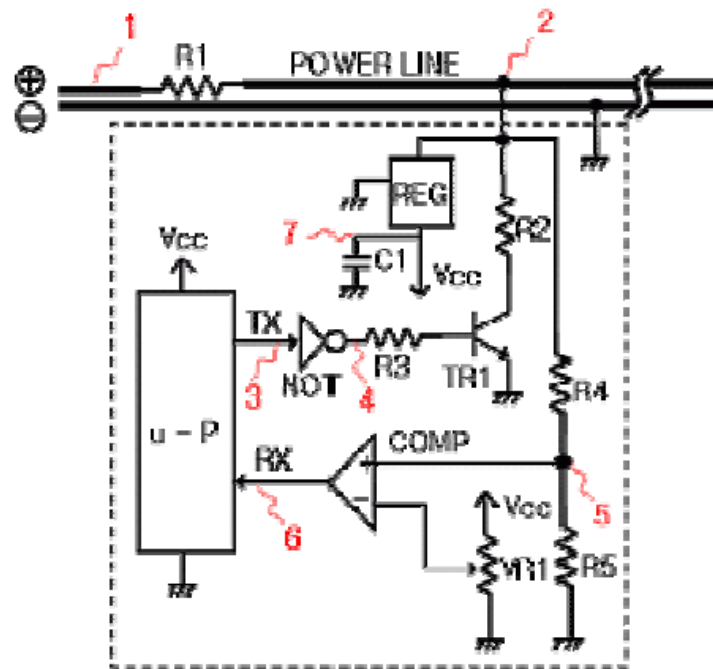


Figura 4.13: Circuito básico para comunicação PLC em DC-BUS [10].

Existem de momento, já vários modems disponíveis no mercado para a comunicação por PLC, e a maioria dos quais, aceita como entrada/saída, um dos protocolos já acima referidos. Da vasta gama existentes, destacam-se, o *MAX2990* da *Maxim Integrated* com um custo de 22.64euros (preço no comerciante *Mouser Electronics*), ou o *CY8CPLC10* da *Cypress Perform* com o preço de 7.82euros (valor obtido na mesma fonte). O bit rate varia entre sistemas, mas o mais alto dos 2 permite uma velocidade de comunicação de 100kbps.

## Capítulo 5

# Construção do Protótipo

Já foi referido por diversas vezes, que as maiores limitações associadas à conceção de uma bateria para utilizar num EV, são a sua densidade energética por unidade de volume, bem como a sua densidade energética por unidade de peso. Também a eletrónica associada ao controlo de cada módulo, que prefaz a bateria, tem relevante importância na determinação do seu custo.

Assim, após alguma reflexão, a decisão recaiu sobre a construção de módulos, utilizando células de LI-Ion, do tipo 18650, que após alguma pesquisa, se consideraram as mais indicadas (tabela 5.1), por registarem a melhor relação densidade energética por unidade de peso, de volume e de preço. Os resultados apresentados, indicam as características de alguns dos produtos, disponíveis no mercado, fabricadas pela *Panasonic*. É também de registar, o elevado número de fabricantes de células deste tipo, que normalmente têm capacidades definidas entre os 1500mAh e os 3400mAh.

Tendo em conta que as células adquiridas (sem identificação do fabricante, e de origem chinesa), apesar de especificarem como capacidade, 3600mAh, têm apenas 2200mAh (valor típico, das células 18650, mais baratas), pelo que, considerou-se como ideal, módulos de aproximadamente 12V e 17600mAh, numa configuração, idêntica à apresentada na figura 5.1.

Considerando, que o peso medido para cada célula é de 40g, e que o peso da PCB é de 82g (com cerca de 70 % dos componentes soldados), estima-se, que o peso total do módulo ronde os 1500g, tendo em conta o peso da ventoinha e do encapsulamento. Pode-se então concluir que a densidade energética por unidade de volume e de peso, por módulo, é de aproximadamente 0.20Wh/cm<sup>3</sup> e 141.0Wh/kg, respectivamente.

Depois de decidir, todas as funcionalidades que se pretendiam para o circuito, e após vários processos de simulação, desenhou-se a PCB exposta na figura 5.2, que posteriormente se imprimiu. No final deste capítulo expõe-se de forma pormenorizada, a distribuição do hardware pela PCB.

### 5.1 Hardware

Nesta secção é apresentada de forma discriminada toda a eletrónica que compõe o sistema em causa. É de notar que sendo a finalidade desta PCB, controlar células de bateria, todos os componentes foram escolhidos de forma a que a sua relação preço/consumo, fosse a melhor, dentro das possibilidades presentemente existentes no mercado.

<i>Mod.</i>	<i>Cap. (mAh)</i>	<i>Peso (g)</i>	<i>V<sub>nom</sub>(V)</i>	<i>diam X H (mm)</i>	<i>Prego aprox. (USD)</i>	<i>Wh/(cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Wh/kg</i>	<i>Wh/USD</i>
<i>NCR18500</i>	2000	34	3.7	18.2 X 49.4	7.15	0.58	218	52.9
<i>NCR18650B</i>	3350	47.5	3.7	18.3 X 65.1	8.35	0.72	260	103.5
<i>UR14430P</i>	700	17.5	3.7	13.9 X 42.9	4.00	0.40	148	10.36
<i>UR14500P</i>	840	20.0	3.7	13.9 X 49.2	4.79	0.42	155.4	14.88
<i>UR14650R</i>	1050	26.6	3.7	13.9 X 64.8	4.00	0.40	146.0	15.54
<i>UR16650ZTA</i>	2500	40.5	3.7	16.4 X 64.9	6.74	0.67	228.4	62.35
<i>UR18500F</i>	1600	33.5	3.7	18.1 X 49.3	3.24	0.47	176.7	19.18

Tabela 5.1.: Características de algumas células cilíndricas do fabricante *Panasonic*.



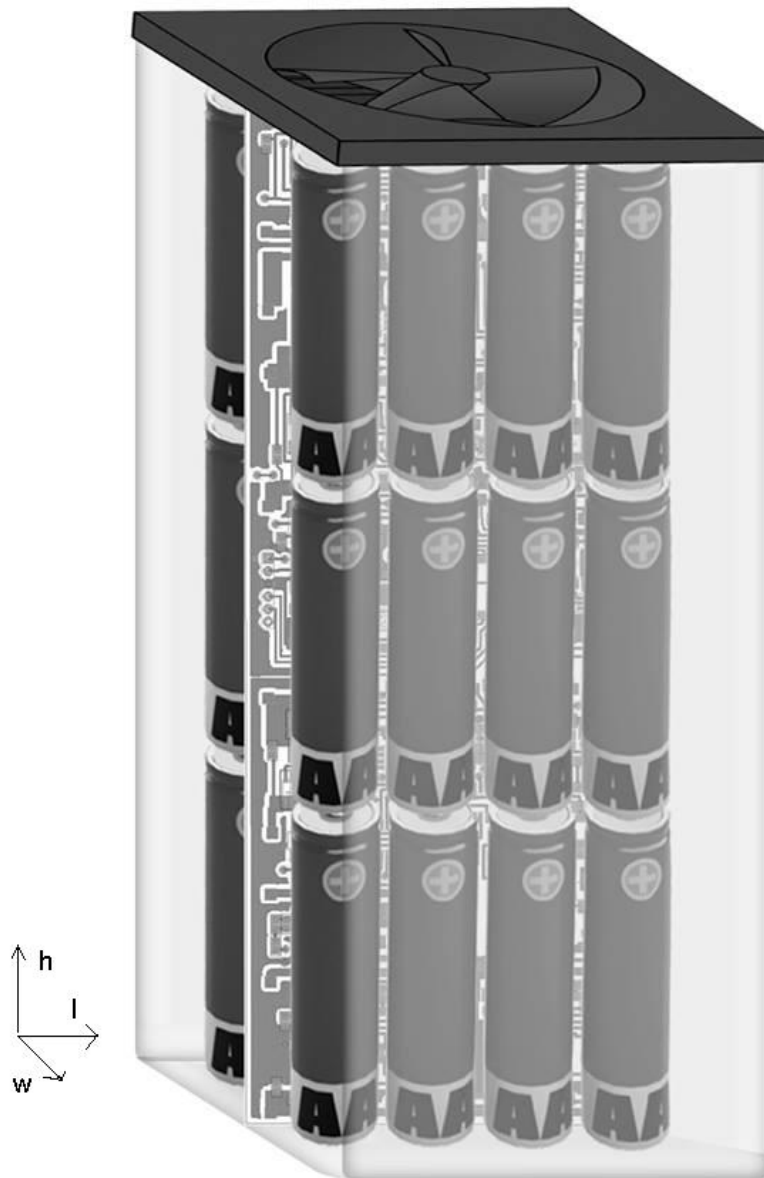


Figura 5.1: Dimensões dos módulos a construir. ( $h=210\text{mm}$ ,  $l=85\text{mm}$  e  $w=60\text{mm}$ )

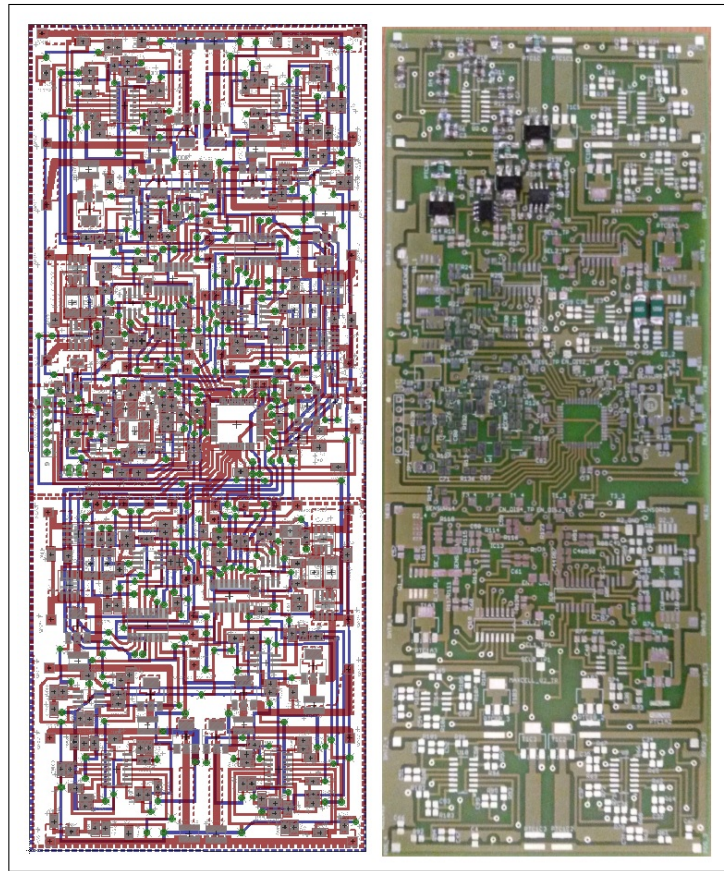


Figura 5.2: Dimensões da PCB. ( $h=200\text{mm}$  e  $l=80\text{mm}$ )

Torna-se importante referir que maioritariamente, os componentes utilizados são da gama 0805, e apresentam um erro máximo de 5%.

### 5.1.1 Medição do potencial, corrente e temperatura / Equalização das células

Por forma a controlar os parâmetros indicados no título deste subcapítulo, que são essenciais ao bom funcionamento do módulo, optou-se por uma solução em que as medições são feitas em conjuntos de duas células em paralelo, divididas por 4 canais, como demonstra a figura 5.3.

A figura 5.4, esquematiza, a forma como as medições são feitas em cada um dos canais.

De forma a obter o exposto no diagrama anterior, utilizou-se, para os blocos que representam a medição do potencial, a configuração eletrónica que se apresenta na figura 5.5. Esta, pode ser matematicamente descrita por,

$$V_{x.x} = \frac{47k}{100k} * (V_+ - V_-) \quad (5.1)$$

Na qual, se consideram  $V_+$  e  $V_-$ , os potenciais aos terminais das células. É de notar a utilização de um ganho inferior a 1, para permitir uma leitura na ADC, dentro da gama de alimentação do micro-controlador. Também se utilizaram condensadores, em paralelo com as resistências de realimentação, para eliminar oscilações a alta frequência na medição.

O valor de potencial, medido, no bloco anteriormente apresentado, é então comparado a outro proveniente da DAC do micro-controlador, que representa o valor máximo de tensão que a célula pode atingir (nodo "MAX CELL VOLT AMP"), para fazer a equalização das células na fase do carregamento (representado na figura 5.4, pelos "comparadores", e "interruptores", anexos aos mesmos). O circuito apresentado na figura 5.6, reflete a opção eletrónica utilizada. O circuito consiste num operacional, montado numa configuração não inversora, com um ganho de  $100V/V$ , para que quando a célula atinja "MAX CELL VOLTAGE", crie um caminho de baixa resistência em paralelo, fazendo a corrente fluir pelo mesmo. Isto permite, que a corrente continue a fluir pelas células que ainda não atingiram o potencial necessário. Verificou-se durante os testes, que o ganho anterior era insuficiente, o que levou ao aumento do ganho para  $1000V/V$ . É de notar, que este circuito, funciona como um regulador *shunt*, e que se o ganho do mesmo for demasiado alto, o controlo do transístor, pode entrar em oscilação.

Utilizando a configuração já anteriormente apresentada, para a medição do potencial nas células, mas com ganhos mais elevados, criou-se um circuito para medição do potencial, aos terminais do paralelo de duas resistências de  $0.005\Omega$ , inseridas em série com as células, como apresentado na figura 5.7. Pretende-se com este potencial, calcular no microcontrolador, a corrente que flui no canal. A utilização de 2 circuitos, prende-se com o facto da corrente de descarga, fluir em sentido inverso à corrente de carregamento.

Para permitir que cada canal no circuito seja independente dos outros, isto é, para que seja possível ligar/desligar cada um dos canais, utilizaram-se 2 transístores do tipo MOSFET aos terminais das resistências utilizadas para o cálculo da corrente. É de salientar, o facto da massa estar isolada das células por esses mesmos transístores. A figura 5.8 ilustra a eletrónica utilizada nesta situação. A presença de 2 transístores, deve-se uma vez mais, ao facto de se conseguir controlar a corrente nos dois sentidos. O consumo deste circuito também é de baixo valor quando comparado com os restantes.

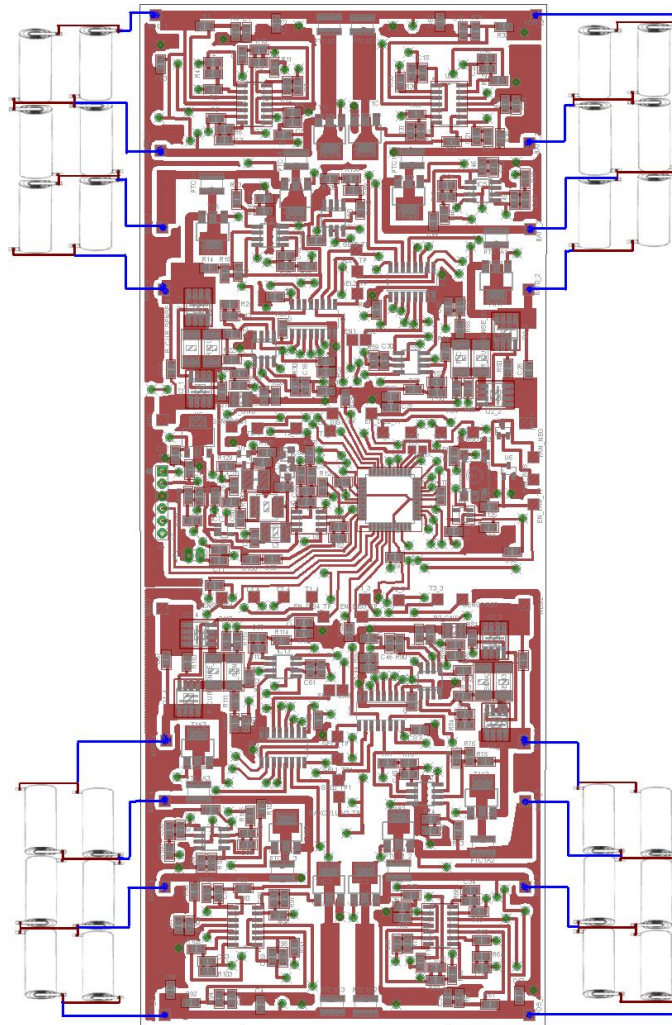


Figura 5.3: Ligações entre a PCB e as células. (Escala de apresentação das células muito reduzida).

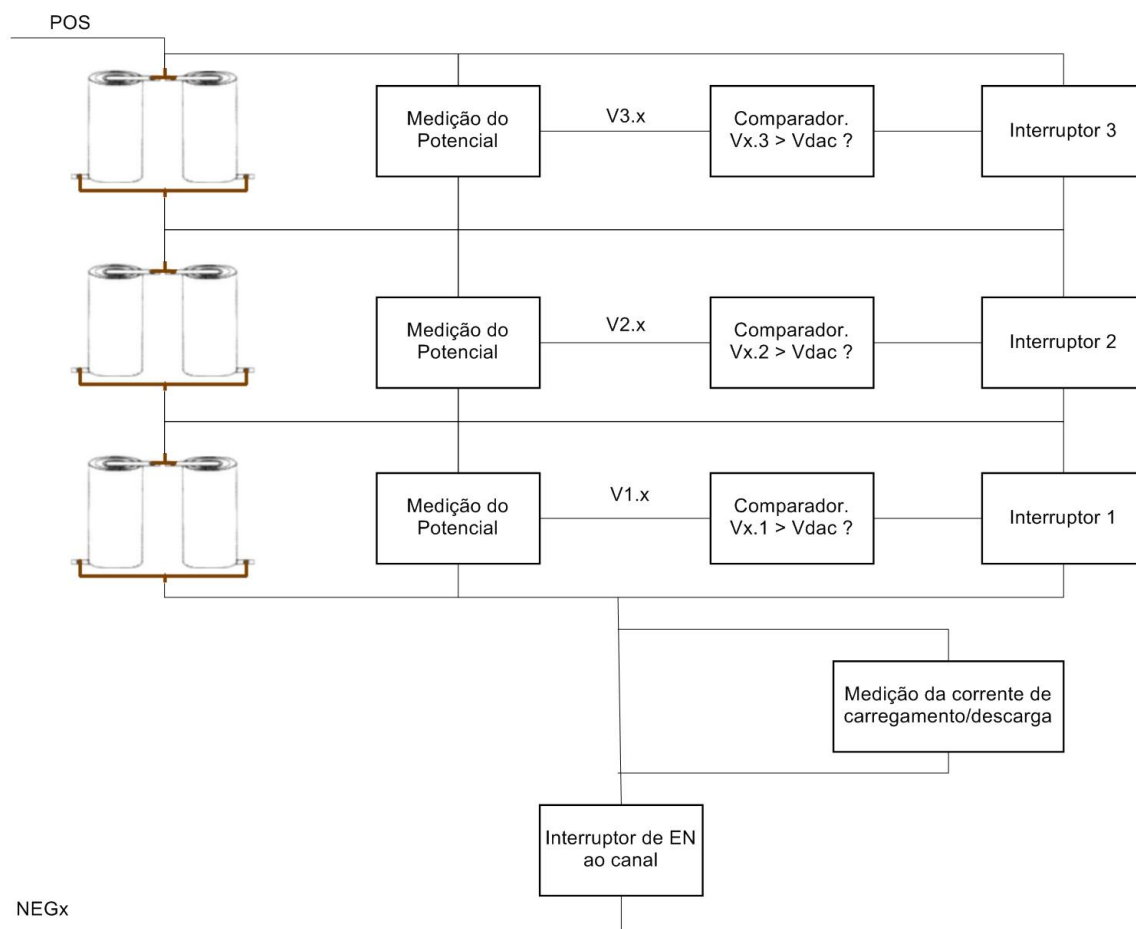


Figura 5.4: Esquema exemplificativo para medição do potencial e corrente / Equalização das células / ON-OFF

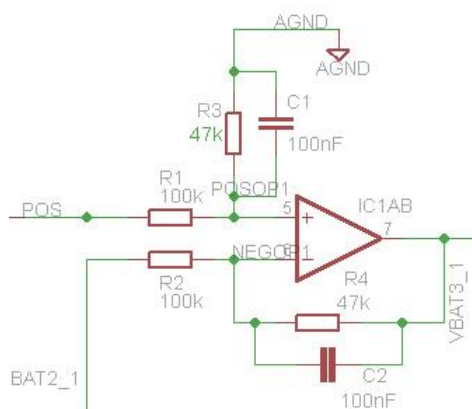


Figura 5.5: Circuito utilizado para medição de potencial na célula 3 do canal 1.

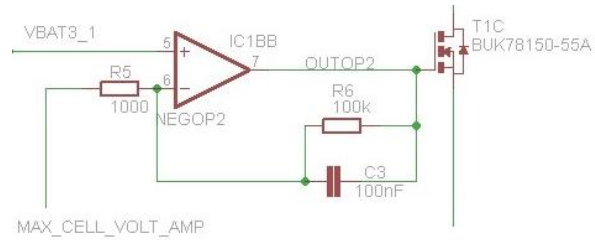


Figura 5.6: Circuito utilizado para equalização de potencial na célula 3 do canal 1.

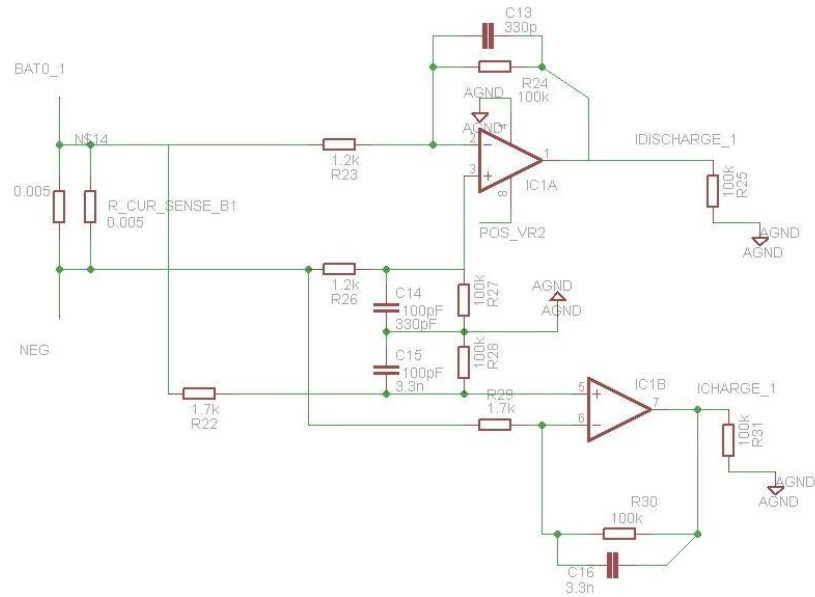


Figura 5.7: Circuito utilizado para medição da corrente no canal 1.

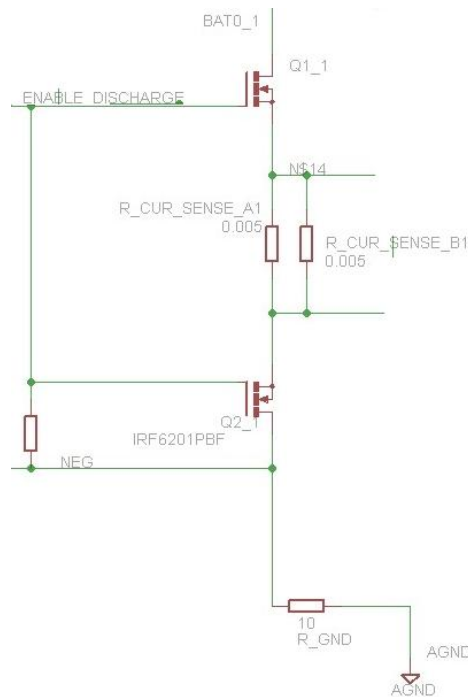


Figura 5.8: Circuito utilizado para enable e disable no canal 1.

A eletrônica que constitui cada canal, e que executa as funcionalidades já expostas, encontra-se presente na figura 5.9. Como é possível visualizar na mesma, foi utilizado um multiplexer do tipo *D4051BM*, para que seja necessária apenas uma entrada ADC no microcontrolador, por cada 6 células, para efetuar todas as conversões para digital, necessárias. A temperatura é uma delas, e pretende-se que seja medida em conjuntos de 2 células.

Os amplificadores operacionais utilizados no circuito são do tipo *TS24L4IDT*, quando em "CI(Circuito Integrado)" de 4 amplificadores, e do tipo *TS24L2IDT* quando em CI's de 2.

Os transístores que têm como função equalizar as células são do tipo *BUK78150*, e os transístores responsáveis pelo ON/OFF do canal, são do tipo *IRF6201PBF*.

Existe também uma PTC *MC36221* entre os transístores de equalização, para evitar curto-circuitos aos terminais das células.

É de notar que o circuito apresentado apenas controla 6 das 24 células do módulo. O mesmo circuito foi replicado na PCB por 3 vezes, para permitir o controlo de todas elas. Deste modo, é possível, por exemplo, por falha de um dos canais, continuar a utilizar o módulo, ainda que com uma capacidade reduzida, sem que a bateria fique totalmente inutilizada.

### 5.1.2 Ventilação das células

Uma das limitações, presente na utilização de baterias, está associada ao acréscimo de temperatura durante as operações de carga/descarga, quando estas são sujeitas a valores de corrente elevados. Pelo que, um sistema de refrigeração/ventilação das células, resulta de forma direta num aumento da potencialidade das mesmas. Face a estas considerações, foi criado um sistema de ventilação com recurso a uma ventoinha, para que a bateria seja utilizada até ao limite da sua temperatura aceitável. Assim sendo, criou-se o circuito presente

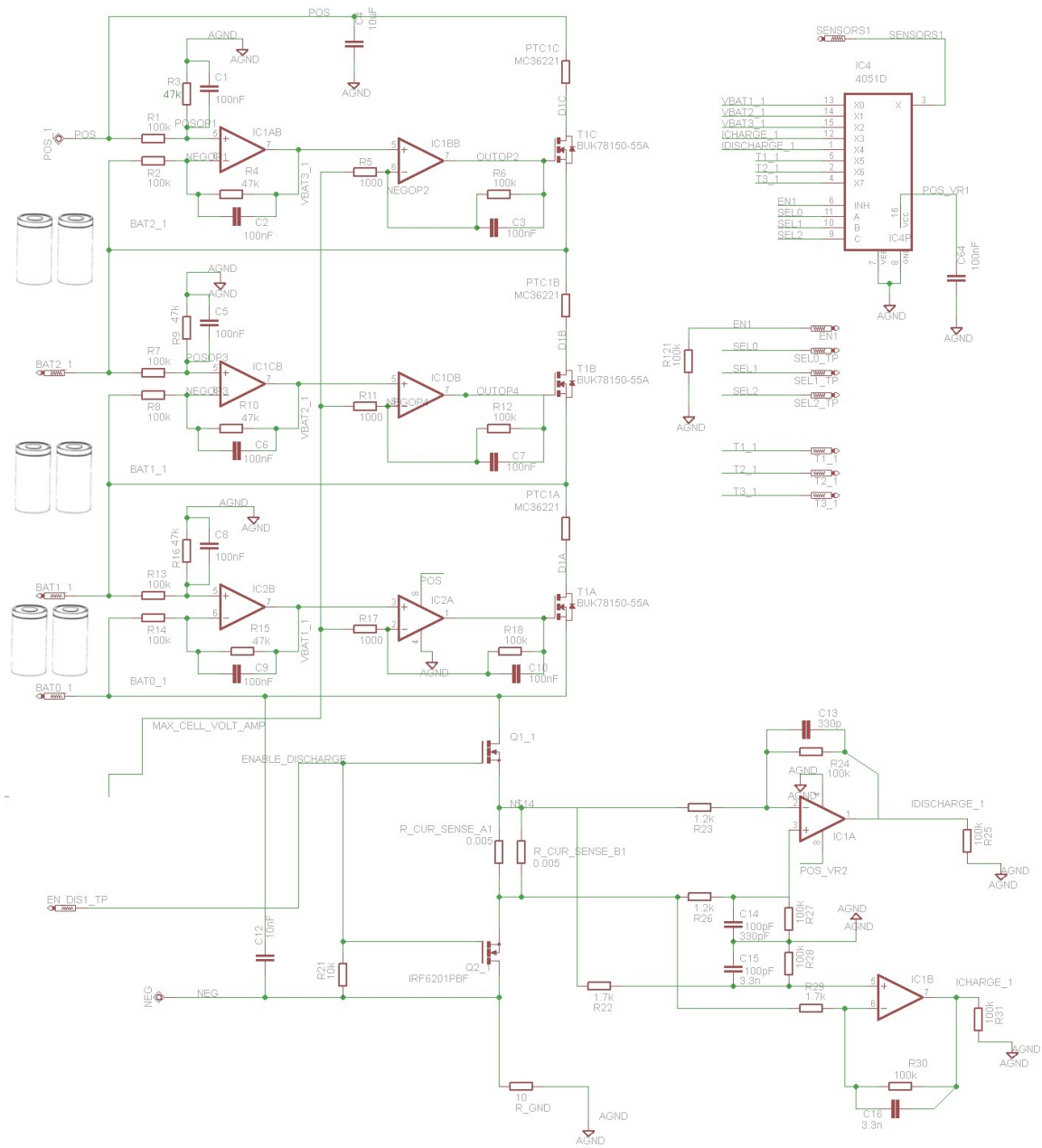


Figura 5.9: Circuito para medição do potencial, corrente e temperatura / Equalização das células / ON-OFF



na figura 5.10, que conectado a uma entrada DAC (PWM) do micro-controlador, terá como finalidade controlar a velocidade desta mesma ventoinha. O transístor que controla o seu funcionamento, é do tipo *RF6201PBF*, e o díodo que protege o circuito da energia armazenada na ventoinha, na altura em que esta é desligada, é do tipo *BAV23A*.

### 5.1.3 Alimentação

A alimentação de todo o circuito, é feita através das células que se controlam. Sendo, o potencial total deste conjunto de células, de aproximadamente 12V, por forma a alimentar o micro-controlador, que requer um potencial de alimentação de 3.3V, foi utilizado um regulador de tensão *MCP1703*.

Como o consumo energético, é um fator determinante na conceção deste circuito, outro regulador de tensão com o mesmo potencial de saída, foi instalado para alimentar os componentes que só são utilizados de forma esporádica. Este regulador, é do tipo *MCP1755*, e tem como principal característica permitir, através de um pino, ligar/desligar o mesmo.

A figura 5.11, esquematiza os reguladores, utilizados para a alimentação da maioria dos componentes. É de notar que os restantes são alimentados de forma direta aos 12V, impostos pelas células.

### 5.1.4 Comunicação

Uma vez que se pretendia implementar um sistema de comunicação, optou-se por aquele que, mecanicamente, necessita de menos fios, i.e., a utilização de um protocolo cujo barramento fosse efetuado por DC-BUS.

Como já foi referido anteriormente, um modem para PLC, tem um preço relativamente elevado, quando comparado, com os restantes componentes utilizados no sistema. Assim sendo, criou-se um sistema de comunicação simples, com uma modulação BPSK, baseado em [30].

### Transmissor

A transmissão, eletronicamente, consiste num circuito, capaz de gerar um sinal a uma determinada frequência, nas linhas de alimentação da bateria. O mesmo foi concebido para recorrer a um sinal PWM, gerado pelo micro-controlador e à eletrónica presente na figura 5.12, para que, gerando uma variação à frequência pretendida, consiga modular o bit 0 ou o bit 1 durante o tempo a programar, como sendo o tempo de 1 bit.

No presente caso, e uma vez que o algoritmo de desmodulação o requeria, utilizaram-se frequências para a modulação dos bits com 1200Hz de diferença. Os resultados da simulação (obtidos através de *PSpice*), presentes na figura 5.13, retratam a emissão de um dos bits modulados, e a respectiva resposta, do filtro que se apresenta no próximo subcapítulo.

O transístor NMOS, responsável pela comutação, é do tipo *IRFML8244TRPBF*.

### Recetor

O recetor, ao nível da eletrónica, consiste, num filtro passa-banda, desenhado para que a sua frequência central seja de aproximadamente 5kHz. A restante desmodulação será feita por software.

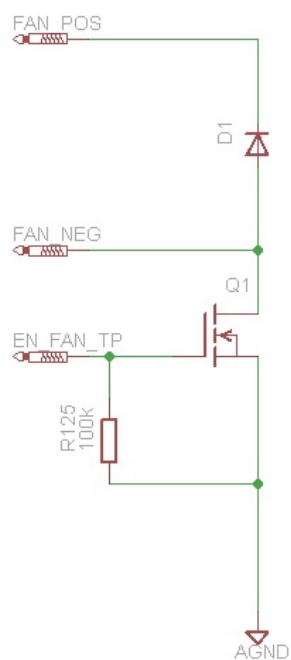


Figura 5.10: Circuito para controlo da ventoinha.

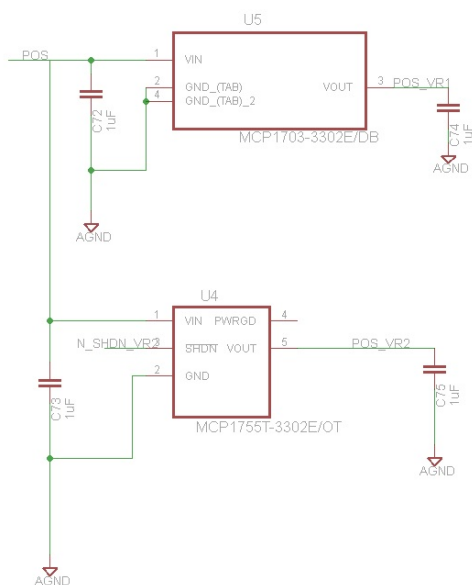


Figura 5.11: Circuitos de alimentação.

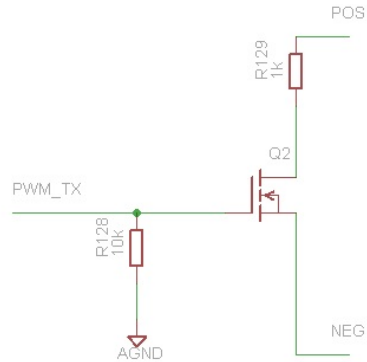


Figura 5.12: Circuito de transmissão PLC.

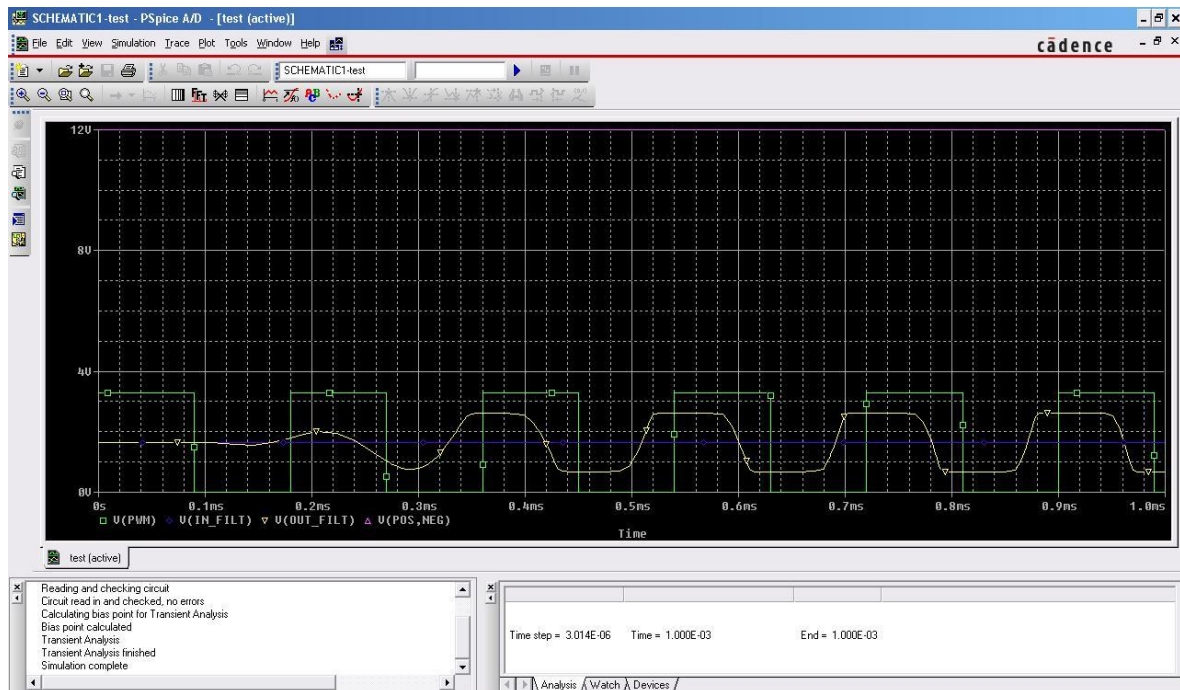


Figura 5.13: Simulação ao barramento DC-BUS com modulação BPSK.

Assim sendo, a figura 5.14 esquematiza todo o filtro. É de notar que o mesmo apresenta uma amplificação de 100 X 100, fruto das configurações não inversoras que se encontram adjacentes a este, nos operacionais do tipo *TS27L2IDT*.

Como é possível verificar pela análise da figura, o divisor resistivo para "Vref", é ativo e efetuado através de um amplificador operacional do tipo *MCP6L01*.

A figura 5.15 apresenta o resultado de uma simulação ao filtro, quando sujeito a um varrimento em frequência.

### 5.1.5 Controlo

Para efetuar o controlo de toda a eletrónica apresentada, ao longo deste capítulo, foi escolhido um micro-controlador de 44 pinos, do fabricante *Microchip*. Este, opera com 16bits, possuindo como principais características um módulo que implementa um "*Real Time Clock and Calendar*", uma ADC, duas DAC's, bem como um conjunto de outras potencialidades.

O modelo deste micro-controlador é o *PIC24FV16KM204*, e a figura 5.16 apresenta todos os pinos a serem utilizados. Na mesma, também se consegue visualizar um interruptor (do tipo *SKHMQKE010*) que foi instalado, por forma a permitir o reinício do micro. Também se deixaram dois pontos de solda na PCB que permitem a comunicação via UART para debug de toda a programação.

A figura 5.17, ilustra, a distribuição pela PCB, dos circuitos de principal destaque. Os canais de "medição de potencial, corrente e equalização" encontram-se representados pelos números 1,2,3 e 4. O número 5, diz respeito aos componentes que executam a comunicação. O 6, indica os pinos responsáveis pela programação do microcontrolador. O 7, inclui os circuitos de controlo da velocidade da ventoinha. O número 8 indica a posição do microcontrolador.

## 5.2 Software

Numa primeira fase, torna-se importante perceber, quais as principais configurações e registos utilizados no micro-controlador (tabela 5.2), para se obter o funcionamento, que depois se processa em ciclo infinito, recorrendo a três funções que permitem atuar sobre todas as características que se consideram relevantes neste circuito.

Todas as conversões do valor lido na ADC, para o valor real de medição, foram efetuadas através de linearizações em mais de 3 pontos.

O "DFD(Diagrama de Fluxo de Dados)" presente na figura 5.18 esquematiza todo o processo.

### 5.2.1 Funcionamento Normal

As duas funções que regulam os parâmetros das células, que se pretendem calcular e controlar, como já foi visto no diagrama anterior, são as "*CheckLimits()*" e "*CheckState()*". As figuras 5.19 e 5.20 esquematizam o funcionamento das mesmas, respetivamente.

Também foi implementado um algoritmo dinâmico para a descarga, que se crê aumentar o potencial do sistema, para além de permitir a desativação "automática", de um canal que se encontre com uma célula em más condições. O funcionamento global do mesmo, encontra-se exemplificado no DFD presente na figura 5.21.



<i>Função/Registo</i>	<i>Observações</i>
<i>getcharPLC()</i>	<i>Função para receber um char através de PLC. É do tipo blocked, i.e., quando invocada espera até à chegada de um sinal. 8 bits de sinc.</i>
<i>sendcharPLC(char)</i>	<i>Função para enviar um char através de PLC. Insere os bits necessários para a sincronização, ao conteúdo do char, e modula cada um dos bits em frequência durante o tempo de bit programado.</i>
<i>lerADC(SENSOR)</i>	<i>Função para fazer uma leitura no módulo ADC, previamente configurado para 12 bits e tempo de conversão mínimo.</i>
<i>ENmaxcell(uint8)</i>	<i>Função para seleccionar o potencial no módulo DAC, que no presente caso é de 8 bits. Este, determina o potencial de equalização das células.</i>
<i>ENpwmfan(duty)</i>	<i>Função para seleccionar o duty – cycle no módulo OCM, responsável pela activação da ventoinha.</i>
<i>confRTCC()</i>	<i>Função para configurar o módulo "real time clock and calendar", que permite um registo do tempo.</i>
<i>confUART()</i>	<i>Função para configurar o módulo UART. Destaca – se o baudrate de 9600. Também se implementaram as funções para "send" e "read".</i>
<i>CAPinit</i>	<i>Registo que guarda informação, sobre a capacidade inicial das células.</i>
<i>CAPmax</i>	<i>Registo que guarda informação, sobre a capacidade máxima das células, após carregamento.</i>
<i>CAPactual</i>	<i>Registo que guarda informação, sobre a capacidade restante nas células.</i>
<i>ncycles</i>	<i>Registo que guarda informação, sobre o número, de carregamentos completos, efectuados, desde o ligar do módulo.</i>
<i>SOC</i>	<i>Registo que guarda informação, sobre a quantidade de carga, restante na bateria.</i>
<i>SOH</i>	<i>Registo que guarda informação, sobre o estado de vida, da bateria.</i>

Tabela 5.2: Principais funções/registos presentes no microcontrolador [18].

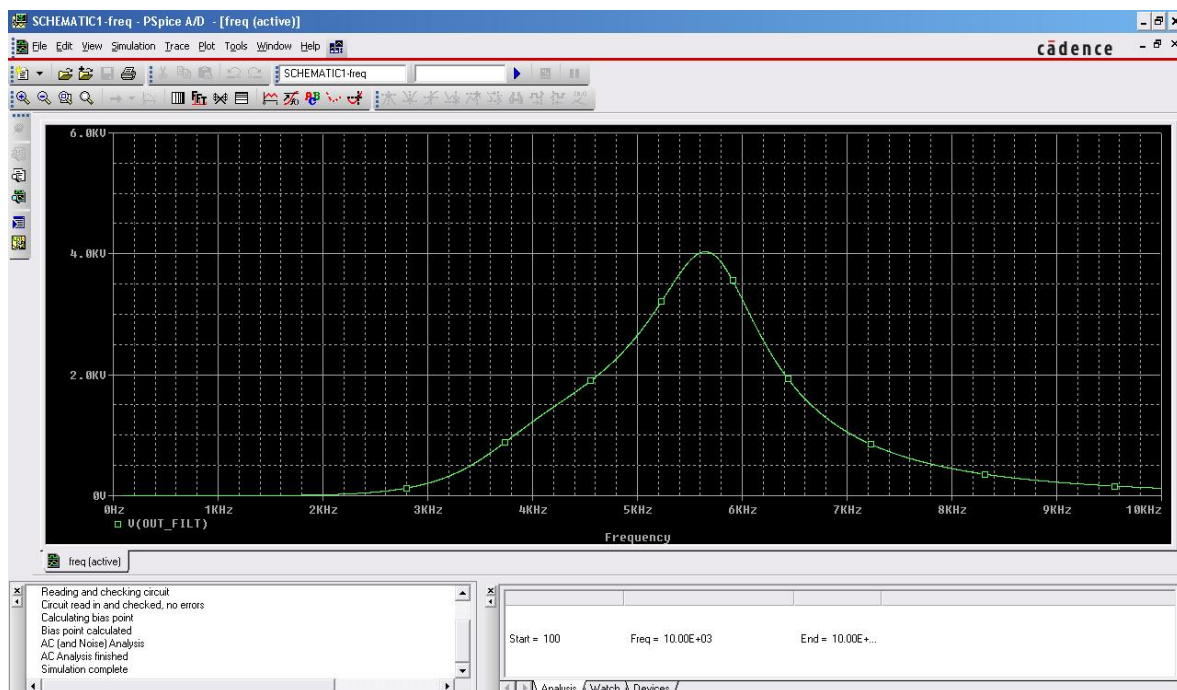


Figura 5.15: Simulação da resposta em frequência do filtro.

### 5.2.2 Comunicação

Na comunicação, após o filtro 5.1.4 analógico, a restante desmodulação "BFSK( Binary Frequency Shift Keying)", fica a cargo de um algoritmo programado para o efeito.

O esquema 5.22, apresenta as etapas que foram programadas, na forma de um "controlador digital", para que a desmodulação se efetue com sucesso [30][31].

Em primeiro lugar, e para se perceber melhor o funcionamento da desmodulação, convém especificar que as frequências que modulam os bits 0 e 1 no emissor, se encontram, diretamente relacionadas, com a frequência escolhida para ser a frequência da portadora (no presente caso,  $f_c = 5kHz$ ), e assim sendo, escolheu-se uma frequência de amostragem, 4X maior,  $f_a = 20kHz$ . Pelo que, as frequências de modulação, podem ser calculadas como (utilizando um espaçamento de  $1200Hz$  entre frequências, que normalmente é calculado em função do baudrate pretendido):

$$f_0 = (f_a/4) + 600 \quad (5.2)$$

$$f_1 = (f_a/4) - 600 \quad (5.3)$$

Posteriormente, converteu-se cada um dos blocos, presentes no diagrama, para o seu equivalente digital, através da utilização da função *Matlab c2d()*, com a aproximação *zero order hold*. Os coeficientes obtidos, foram então programadas na forma de um algoritmo de controlo.

Para a simulação do circuito, criou-se um sinal, figura 5.23 (o gráfico que apresenta o resultado do sinal em frequência, encontra-se sem a componente espectral DC, por esta ser muito elevada), idêntico ao amostrado na ADC do microcontrolador e utilizaram-se sempre

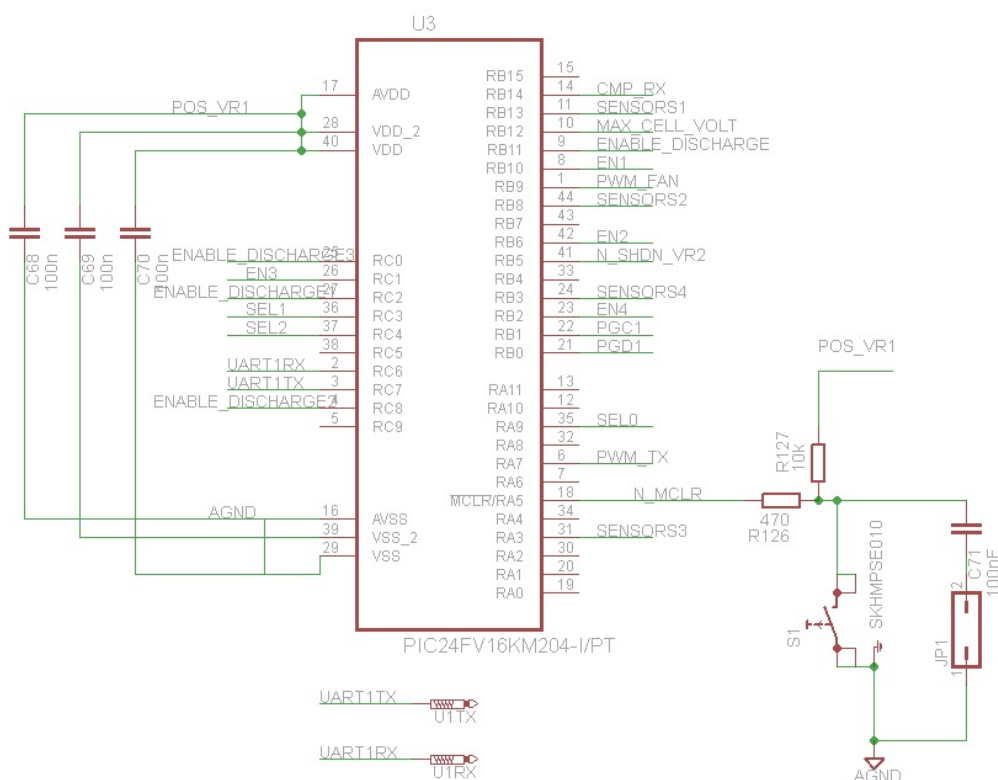


Figura 5.16: Micro-controlador com respectiva associação de pinos.



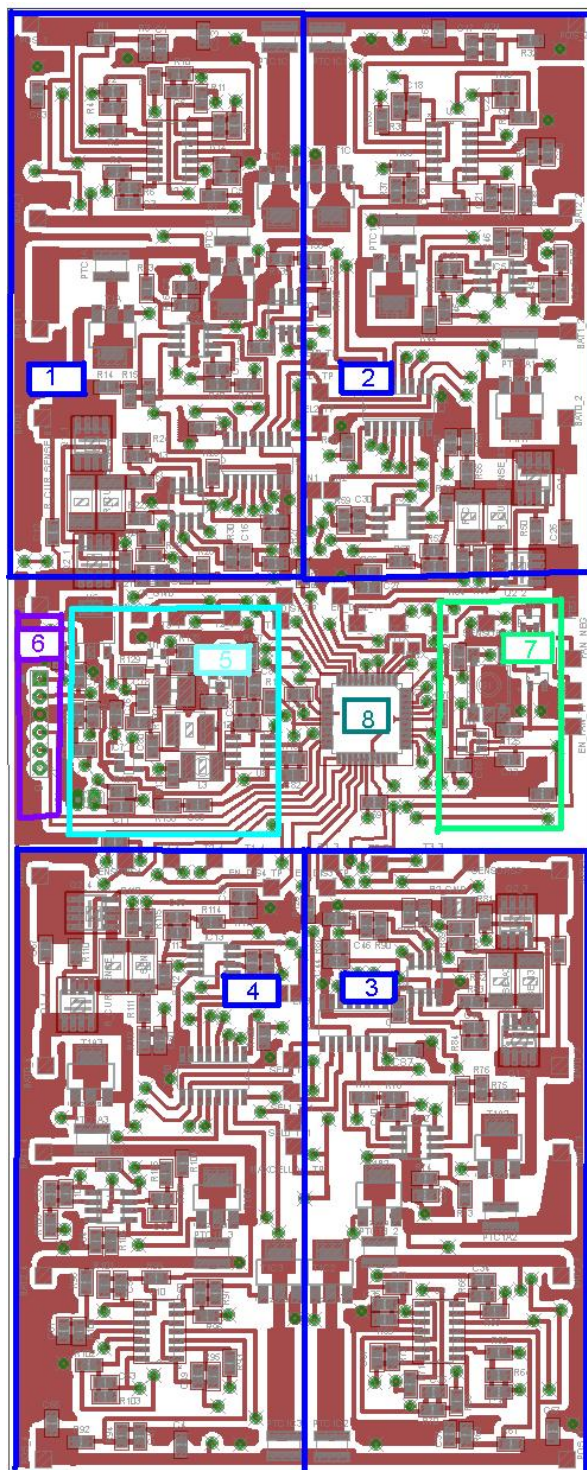


Figura 5.17: Distribuição da electrónica pela PCB.

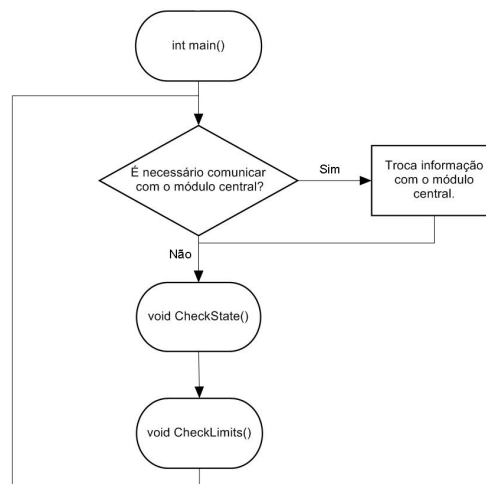


Figura 5.18: Funcionamento do software -Função main.

inteiros, para evitar a utilização de operações com vírgula flutuante. A figura 5.24 é resultado de uma simulação nas condições anteriores, quando o tempo de bit se encontra programado para  $2ms$ , e a sequência a binária a enviar é 0101 0100 0011 1100.

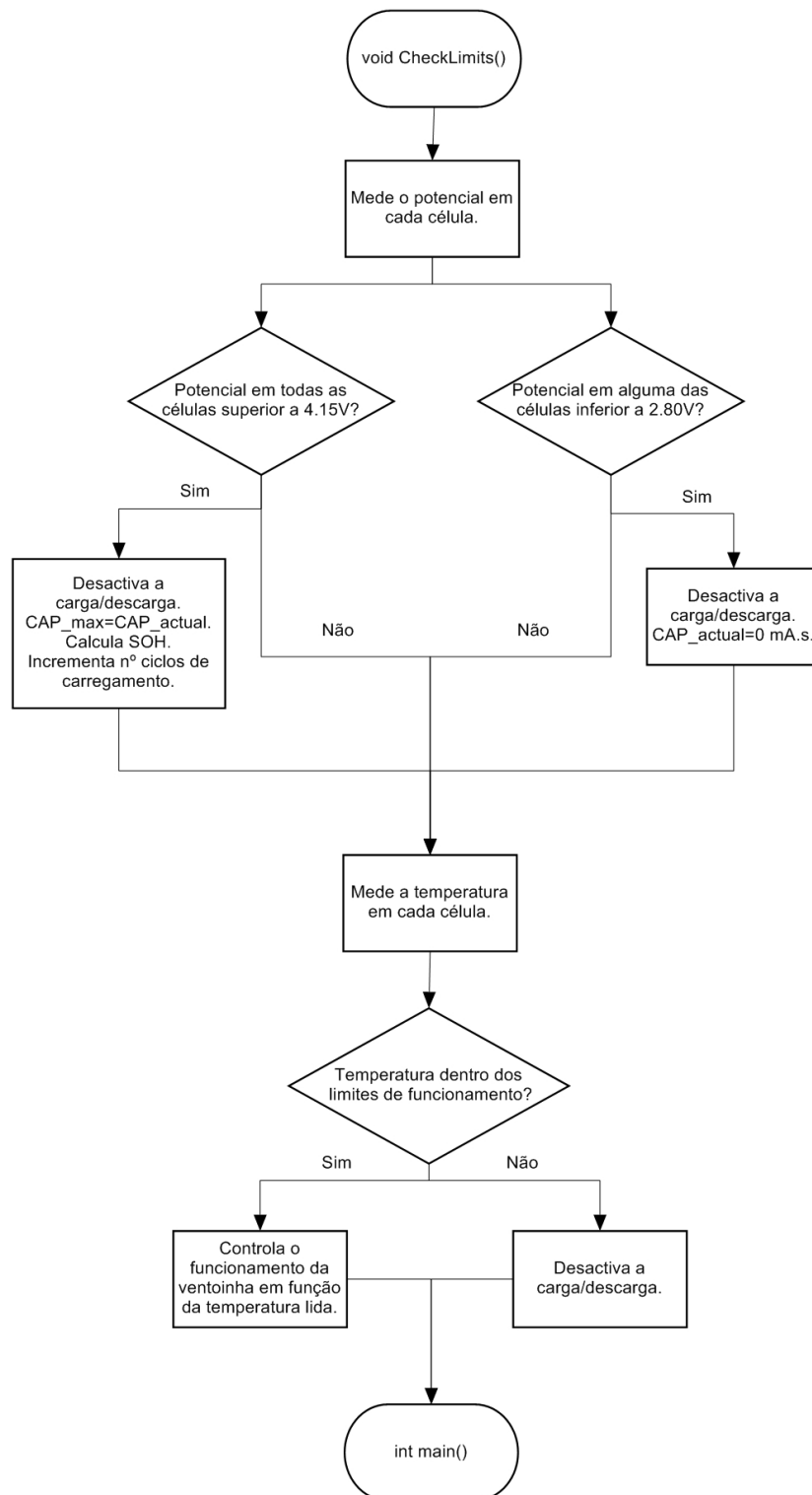


Figura 5.19: Funcionamento do software -Função CheckLimits.

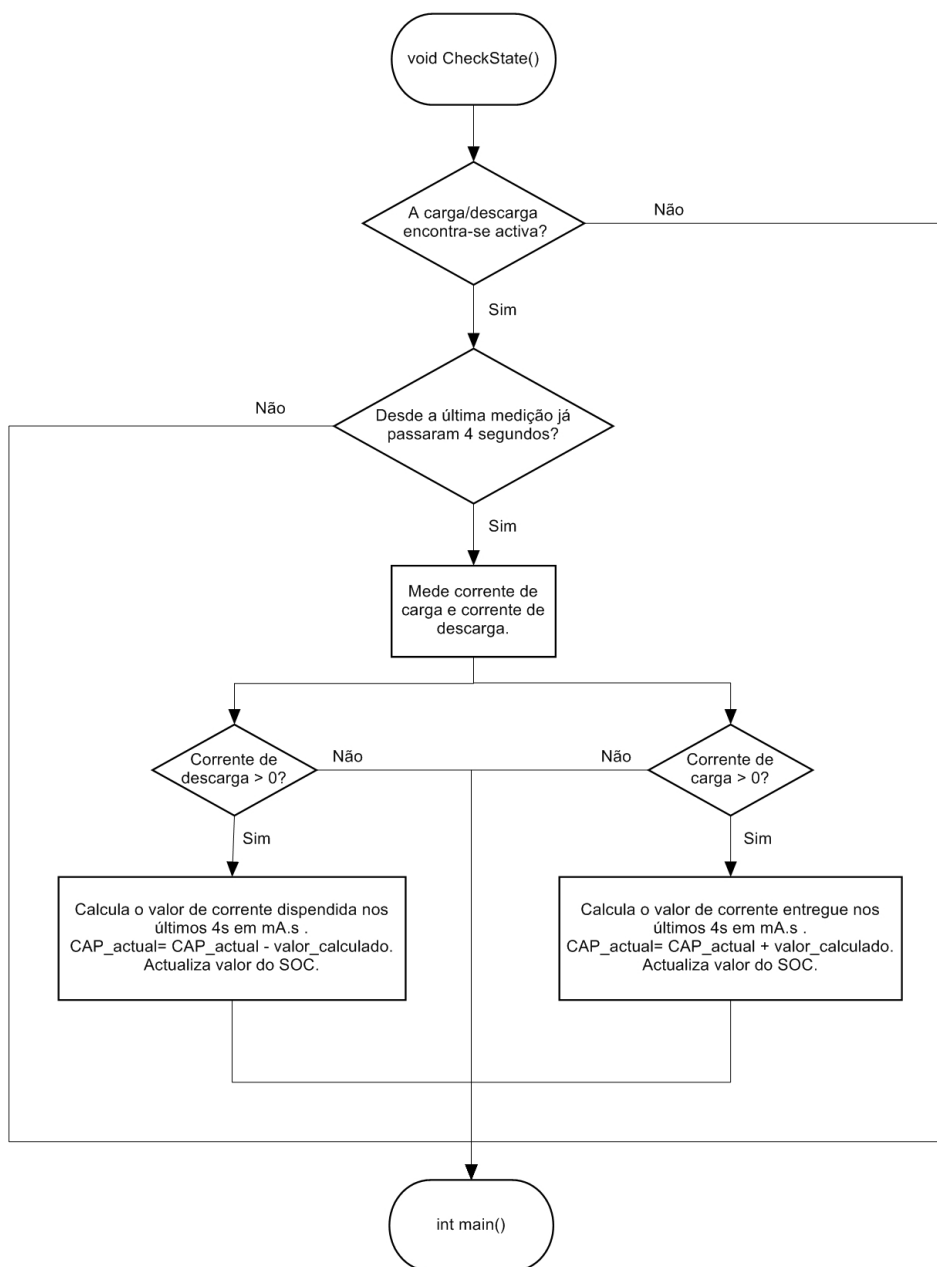


Figura 5.20: Funcionamento do software -Função CheckState.

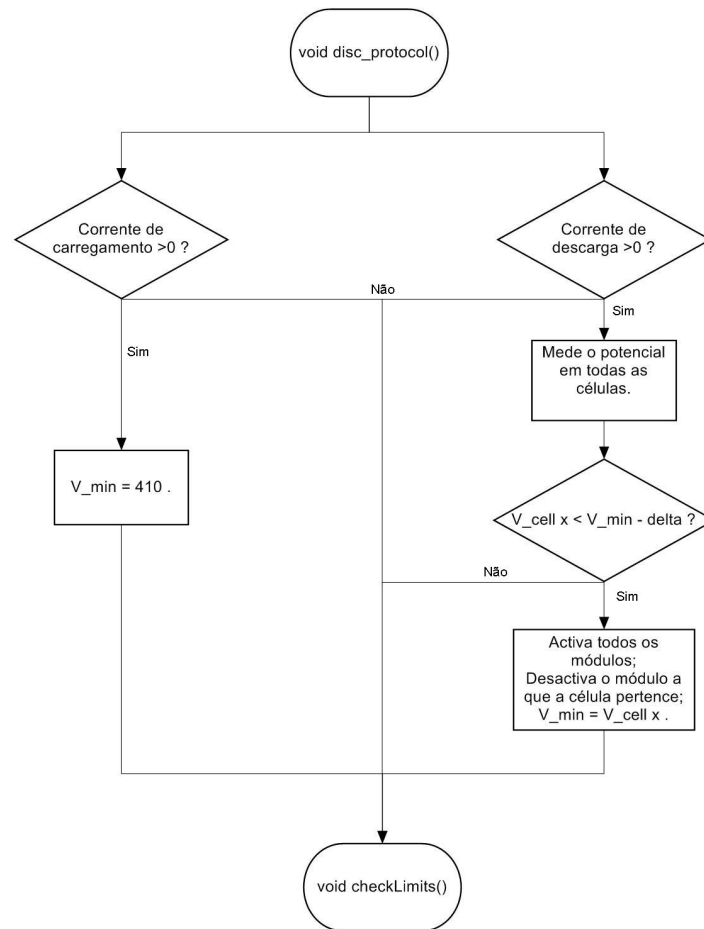


Figura 5.21: Funcionamento do software -Função discProtocol.

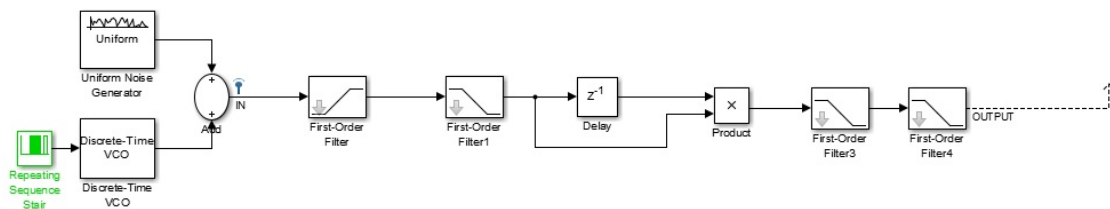


Figura 5.22: Funcionamento do software -Algoritmo de desmodulação.

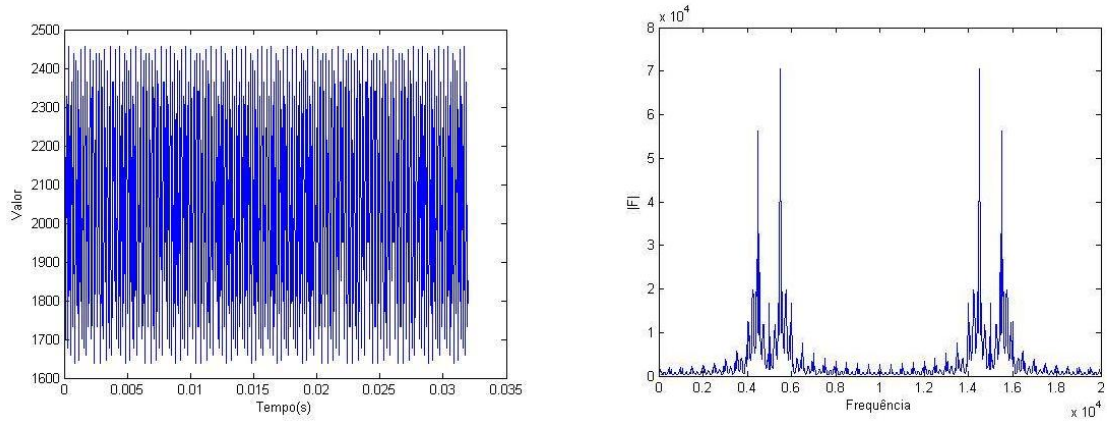


Figura 5.23: Sinal criado para simulação da desmodulação; Conteúdo espectral de frequências deste sinal.

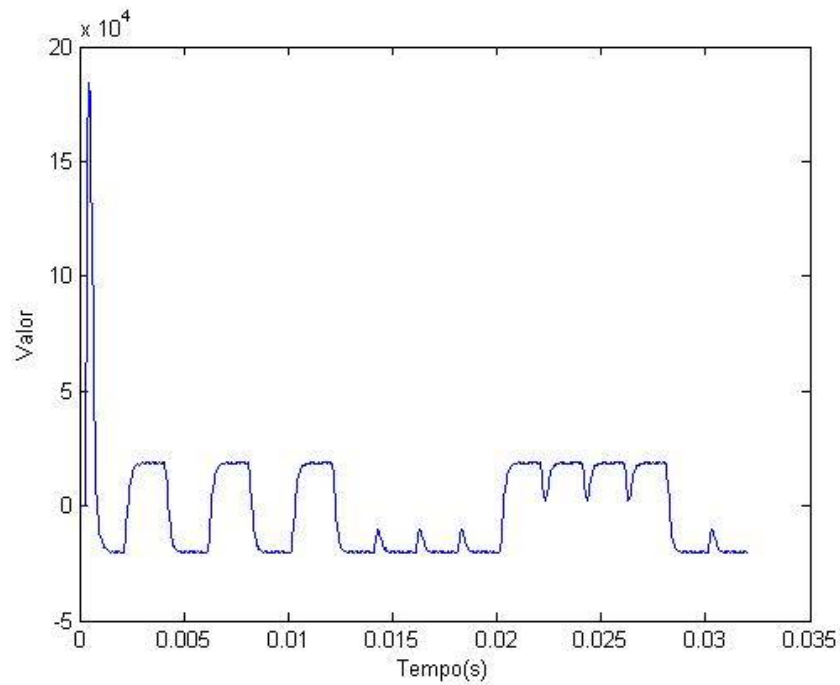


Figura 5.24: Resultado na saída do algoritmo de desmodulação.

## Capítulo 6

# Testes e Resultados

Numa primeira fase, e para garantir o bom funcionamento do módulo, figura 6.1, sem submeter as células a desgaste desnecessário, testou-se o mesmo, injetando corrente nas resistências que efetuam a medição desta, utilizando, um circuito idêntico ao apresentado na figura 6.2, que permite, ao inverter as ligações à fonte, simular os processos de carregamento e de descarga.

Os resultados apresentados na tabela 6.1, foram obtidos durante o ciclo de funcionamento normal do módulo, refletindo, nas condições já expostas, todos os parâmetros que se controlam. A comunicação, é do tipo série, e efetuada via UART, a um baudrate de 9600, através de uma interface criada para o efeito, figura 6.3. A fonte de tensão, que é do tipo "PS613" (Vsrc), disponibiliza um mostrador que indica a corrente a ser fornecida, valor que também se inclui na tabela. Estes testes foram realizados controlando apenas 3 das células que totalizam o sistema.

Na sequência do teste anterior, foi realizado outro idêntico, para simular o carregamento. A tabela 6.2 apresenta os resultados do mesmo.

Os testes, à comunicação por PLC, foram feitos, recorrendo a um módulo DETPIC32, e ao seu "OCM( Output Compare Module)", para gerar as frequências, que emitidas por PLC, se vieram a desmodular no recetor, que no presente caso, é o módulo da bateria (figura 6.4). O tempo de bit configurado é de 5ms, e cada byte é emitido com 8 bits para a sincronização/convergência do algoritmo. Na figuras 6.5 e 6.6 encontram-se presentes, as interfaces utilizadas em cada um dos dispositivos, e na 6.7, os sinais obtidos através de osciloscópio no emissor, e no filtro do recetor.

É de extrema importância realçar, que o algoritmo apresentado, requeria a utilização de inteiros de pelo menos 32 bits, para evitar o *overflow* de qualquer um dos blocos programados. No entanto, concluiu-se que a velocidade de processamento, não era suficientemente alta, para permitir executar o algoritmo, durante o tempo de amostragem requerido. Assim, diminuíram-se as escalas dos cálculos em cada bloco, para permitir, o funcionamento com inteiros de 16 bits, e cumprir com os requisitos temporais. Também se diminuiu a frequência de amostragem, para  $f_a = 13000kHz$ , e respectivas frequências de modulação. O diminuir da escala, traz, conseqüentemente, um aumento no tempo de convergência do algoritmo.

A utilização de inteiros de 16 bits, para cálculos, é deveras problemática, uma vez que uma pequena alteração na amplitude do sinal pode fazer "overflow" ao registo, e interromper todo o processo de convergência do mesmo. Pelo que, é possível resolver esta questão, alterando a velocidade de processamento do micro-controlador, ou criando um algoritmo de certa forma



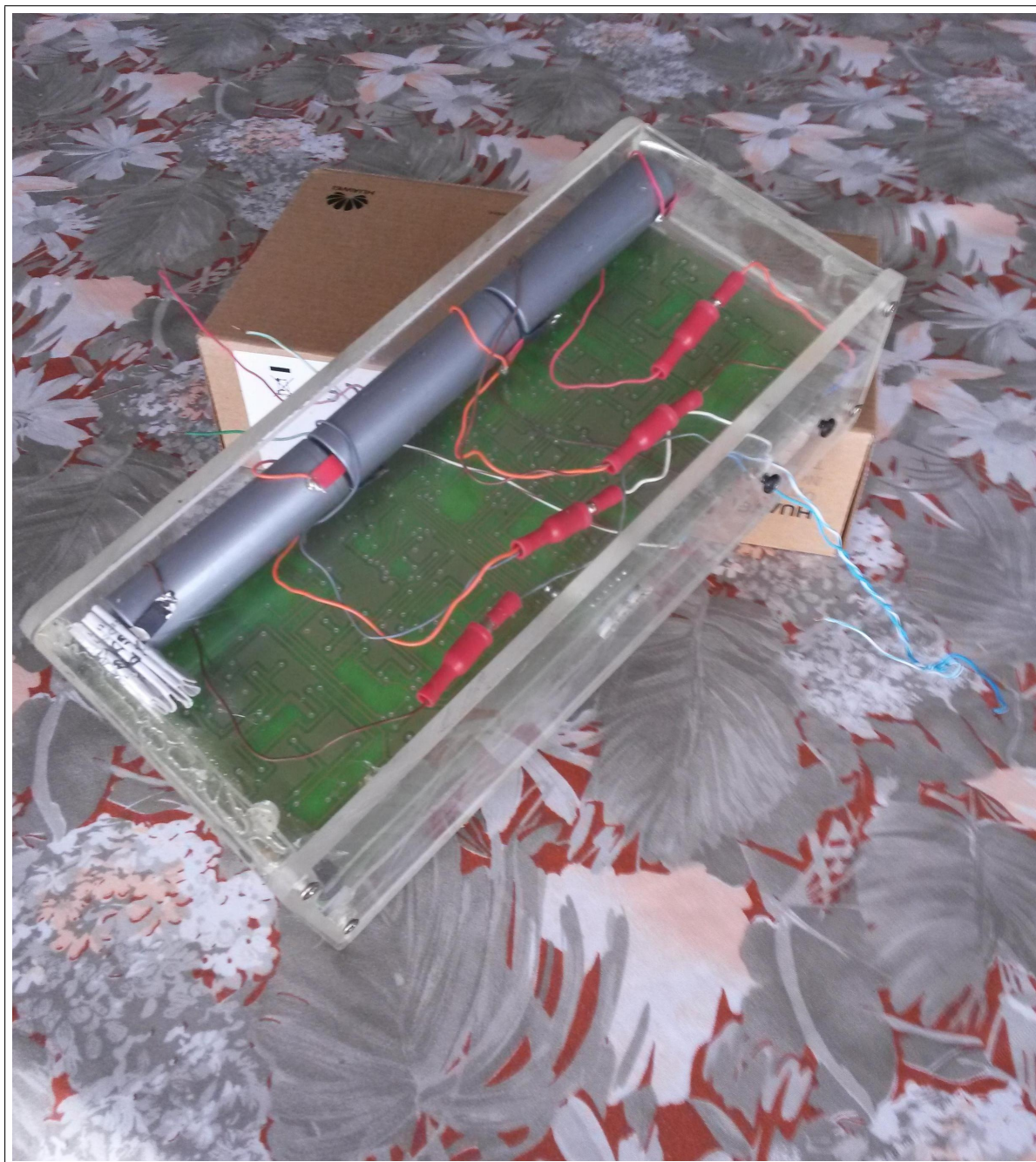


Figura 6.1: Módulo construído com 3 das 24 células acopladas.



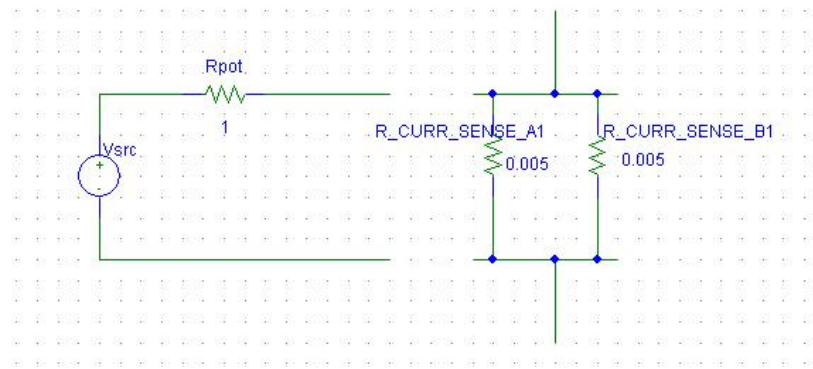


Figura 6.2: Circuito para teste à medição da corrente de carregamento.

```

COM4 - PuTTY

*****BAT CONTROL MENU*****
*****
Opcoes:
1- Verificar potencial na celula 1.1
2- Verificar potencial na celula 1.2
3- Verificar potencial na celula 1.3
4- Verificar corrente de carregamento
5- Verificar corrente de descarga
6- EN_VR2
7- DIS_VR2
8- Test PWM fan
9- Timer 1 value
y- Test PWM TX
g- Get bit PLC
T- Get char PLC
R- Get string PLC
t- Time
N- Funcionamento Normal

Opcao N:

Tempo: 00 : 43
V1.1=0
V1.2=0
V1.3=0
Current Flow=0
SOC=100
SOH=100
Capacidade disponivel= 3600
Capacidade max ainda disponivel= 3600

Tempo: 00 : 47
V1.1=363
V1.2=372
V1.3=360
Current Flow=0
SOC=100
SOH=100
Capacidade disponivel= 3600
Capacidade max ainda disponivel= 3600
    
```

Figura 6.3: Interface de comunicação com o micro-controlador do módulo.

<i>Tempo no módulo (mm : ss)</i>	<i>Potencial na célula 1.1 (mV/10)</i>	<i>Potencial na célula 1.2 (mV/10)</i>	<i>Potencial na célula 1.3 (mV/10)</i>	<i>SOC (%)</i>	<i>SOH (%)</i>	<i>Capacidade disponível na bateria (mAh)</i>	<i>Capacidade total disponível (mAh)</i>	<i>Corrente no módulo (mA)</i>	<i>Corrente na fonte (A)</i>
00 : 10	363	372	360	100	100	3600	3600	0	0
00 : 14	363	372	360	99	100	3599	3600	-209	0.20
00 : 22	363	372	360	99	100	3599	3600	-301	0.30
00 : 30	363	372	360	99	100	3598	3600	-553	0.55
00 : 38	363	372	360	99	100	3596	3600	-1053	1.05
00 : 46	363	372	360	99	100	3594	3600	-953	0.95
01 : 02	363	372	360	99	100	3590	3600	-849	0.84
01 : 14	363	372	360	99	100	3588	3600	-281	0.28
01 : 26	363	372	360	99	100	3583	3600	-1529	1.53
01 : 38	363	372	360	99	100	3579	3600	-881	0.88
01 : 46	363	372	360	99	100	3578	3600	0	0.00

Tabela 6.1: Teste, com recurso a fonte, para simulação da descarga.

<i>Tempo no módulo (mm : ss)</i>	<i>Potencial na célula 1.1 (mV/10)</i>	<i>Potencial na célula 1.2 (mV/10)</i>	<i>Potencial na célula 1.3 (mV/10)</i>	<i>SOC (%)</i>	<i>SOH (%)</i>	<i>Capacidade disponível na bateria (mAh)</i>	<i>Capacidade total disponível (mAh)</i>	<i>Corrente no módulo (mA)</i>	<i>Corrente na fonte (A)</i>
02 : 10	363	372	360	99	100	3578	3600	0	0
02 : 14	363	372	360	99	100	3579	3600	228	0.23
02 : 22	363	372	360	99	100	3579	3600	350	0.34
02 : 30	363	372	360	99	100	3580	3600	669	0.66
02 : 38	363	372	360	99	100	3583	3600	1278	1.27
02 : 46	363	372	360	99	100	3585	3600	1290	1.27
03 : 02	363	372	360	99	100	3590	3600	1278	1.26
03 : 14	363	372	360	99	100	3594	3600	1121	1.11
03 : 26	363	372	360	99	100	3598	3600	1116	1.11
03 : 38	363	372	360	100	100	3600	3600	0	0

Tabela 6.2: Teste, com recurso a fonte, para simulação do carregamento.

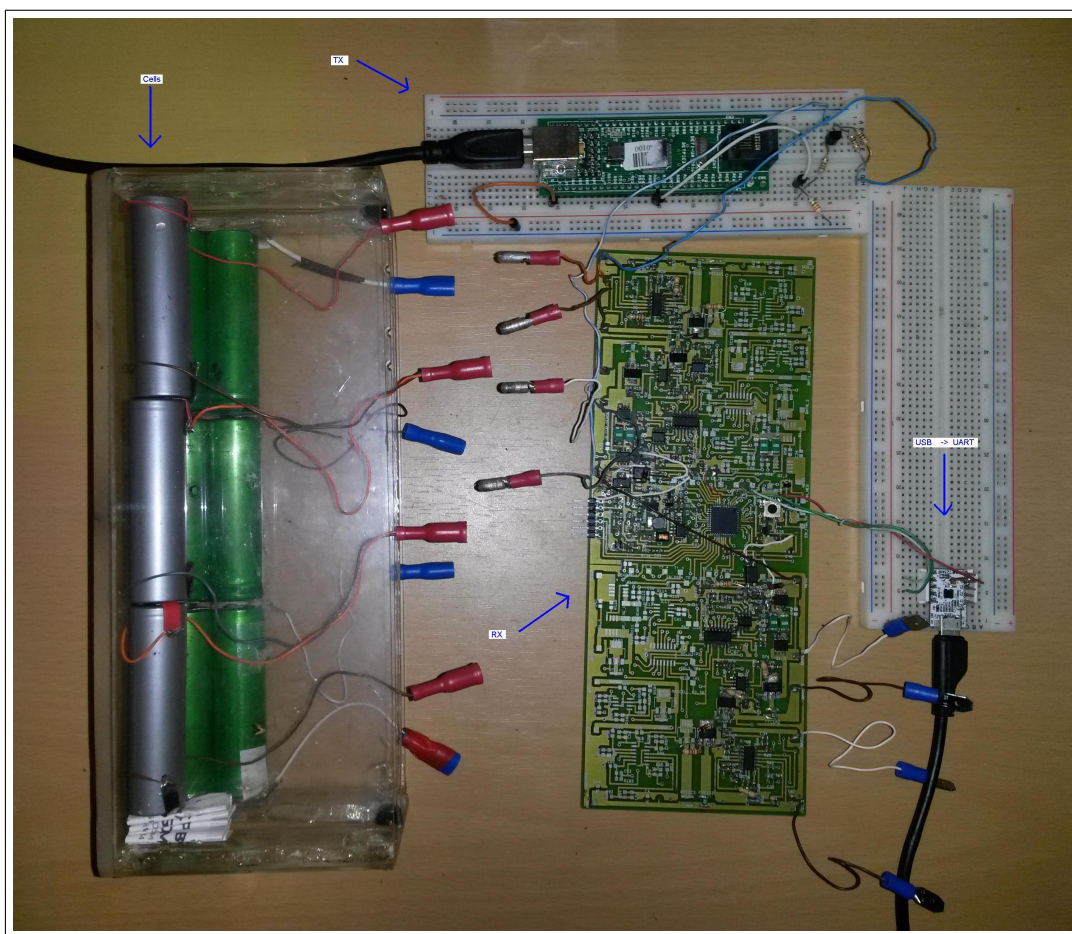


Figura 6.4: Sistema utilizado para teste à comunicação PLC.

dinâmico, que meça a amplitude do sinal na entrada ADC e calibre de forma digital, o sinal lido, para os limites de funcionamento do algoritmo inicial.

Foi também determinada, a impedância do módulo, às frequências de modulação PWM. Para tal, utilizou-se o OCM do DETPIC32 com uma resistência de  $100\Omega$  em série, e o circuito da PCB como carga. As figuras 6.8 e 6.9, apresentam os resultados, obtidos através de osciloscópio, aos terminais dessa resistência. Analisando a figura, conclui-se para a pior das situações, que a impedância é de aproximadamente  $34\Omega$ .

Após verificado, o bom funcionamento das medições, testou-se o processo de carregamento e descarga das células. A figura 6.10, apresenta uma representação gráfica, da parte final do carregamento, i.é., da equalização, onde a corrente entregue pela fonte é de aproximadamente  $100mA$ . Como se pode concluir com uma análise ao gráfico, a equalização não se encontrava a funcionar como pretendido na célula "V1.3". Uma análise mais detalhada, aos transístores utilizados para o efeito (BUK78150-55A, representados no gráfico por Q1, Q2 e Q3), revelou, que de facto a tensão de *threshold*, é demasiado alta para o que se pretende, pelo que, se substituiu o transístor para as restantes simulações. Na simulação que se apresenta, a variação de potencial, máximo e mínimo, entre células, é de  $0.04mV$ . Sugere-se um aumento do ganho, nos circuitos responsáveis pela equalização, de forma a diminuir esta diferença.

Também se verificou, que a transição ON/OFF do transístor era demasiado longa, pelo que se aumentou o ganho nesta parte do circuito. O esquema, alterado, presente no capítulo seguinte, já apresenta um transístor alternativo, que reúne todas as características necessárias.

Na sequência dos testes, também se verificou, que a propriedade de desativar ou ativar a carga/descarga, se encontrava a funcionar de forma diferente do pretendido, como demonstra a simulação que se apresenta na figura 6.11. Como se pode verificar na mesma, o potencial na porta do transístor quando este se encontra desligado, não é suficientemente baixo para o submeter ao corte (por imposição do PWM no nível zero), durante a fase de descarga.

Pelo que, foi incluído no circuito um optocoupler do tipo "PC817", que permite o desacoplamento entre  $V_g$  e a massa do circuito. A presença deste componente, faz com que o problema exposto anteriormente, seja ultrapassado, como é possível verificar na figura 6.12. Outra enorme vantagem, desta configuração, advém do facto de se utilizar um potencial de maior ordem na porta dos transístores, para a situação de "ON". Esta alteração, vai trazer maior eficiência energética, ao circuito, sem necessitar da utilização de díodos de Schottky, em paralelo com os transístores, com vista a eliminar a diferença de potencial que se verifica entre os pontos "NEG", e " $BAT_{0.x}$ ". De seguida, apresenta-se uma explicação mais detalhada.

Como já foi anteriormente apresentado, utilizam-se dois transístores, para permitir o ligar/desligar da carga e descarga. Na fase de "ON" ( $V_{GS} > 0$ ), enquanto um dos transístores, se encontra polarizado em modo direto ( $V_{DS} > 0$ ), o outro, encontra-se polarizado em modo inverso ( $V_{DS} < 0$ ), dependendo do sentido da corrente. Por norma, nos *datasheet's* dos componentes deste tipo, só se encontram referências à condução em modo directo, e em modo inverso quando  $V_{GS} = 0$  (o denominado "body-diode"). Pelo que, alguma investigação, revelou, que o transístor de potência, é normalmente considerado, como tendo uma condução na zona inversa, idêntica à da zona directa, fruto da sua construção, quando  $V_{GS} > 0$ .

No entanto, um estudo a alguns transístores de potência [32], conclui que o mesmo não se verifica, a baixos valores de  $V_{GS}$ . Uma simulação feita às características de saída de um dos transístores (figura 6.13), quando sujeito a diferentes valores de  $V_{GS}$ , ajuda a perceber melhor a situação. Aproveitando os valores da simulação anterior, espelhou-se o terceiro quadrante no primeiro, e verificou-se a diferença na corrente de condução, em modo inverso, e em modo direto, que o transístor exibe a diferentes valores de  $V_{GS}$ . O resultado encontra-se apresentado

```

COM4 - PuTTY
Opcao 6:
    VR2_ENABLED

*****BAT CONTROL MENU*****
*****
Opcoes:
1- Verificar potencial na celula 1.1
2- Verificar potencial na celula 1.2
3- Verificar potencial na celula 1.3
4- Verificar corrente de carregamento
5- Verificar corrente de descarga
6- EN_VR2
7- DIS_VR2
8- Test PWM fan
9- Timer 1 value
y- Test PWM TX
g- Get bit PLC
T- Get char PLC
R- Get string PLC
t- Time
N- Funcionamento Normal

Test get char
010000001000111
G

COM5 - PuTTY
*****BAT CONTROL MENU*****
*****
Opcoes:
0 - Enviar sinal 0/1
1 - Enviar char
2 - Enviar string (5char)
Opcao 1 - Enviar char
char2send G
1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1
*****BAT CONTROL MENU*****
*****
Opcoes:
0 - Enviar sinal 0/1
1 - Enviar char
2 - Enviar string (5char)

```

Figura 6.5: Interfaces de comunicação com o módulo da bateria e a DETPIC32 durante a transmissão de um char.

```

COM4 - PuTTY
Opcao 6:
    VR2_ENABLED

*****BAT CONTROL MENU*****
*****
Opcoes:
1- Verificar potencial na celula 1.1
2- Verificar potencial na celula 1.2
3- Verificar potencial na celula 1.3
4- Verificar corrente de carregamento
5- Verificar corrente de descarga
6- EN_VR2
7- DIS_VR2
8- Test PWM fan
9- Timer 1 value
y- Test PWM TX
g- Get bit PLC
T- Get char PLC
R- Get string PLC
t- Time
N- Funcionamento Normal

Opcao R: getstring PLC
teste

COM5 - PuTTY
*****BAT CONTROL MENU*****
*****
Opcoes:
0 - Enviar sinal 0/1
1 - Enviar char
2 - Enviar string (5char)
Opcao 2 - Enviar string (5chars)
t
e
s
t
e
1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 0
0 1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 1 1
1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 0
0 1 1 0 0 1 0 1
*****BAT CONTROL MENU*****
*****
Opcoes:
0 - Enviar sinal 0/1
1 - Enviar char
2 - Enviar string (5char)

```

Figura 6.6: Interfaces de comunicação com o módulo da bateria e a DETPIC32 durante a transmissão de 5 char's.



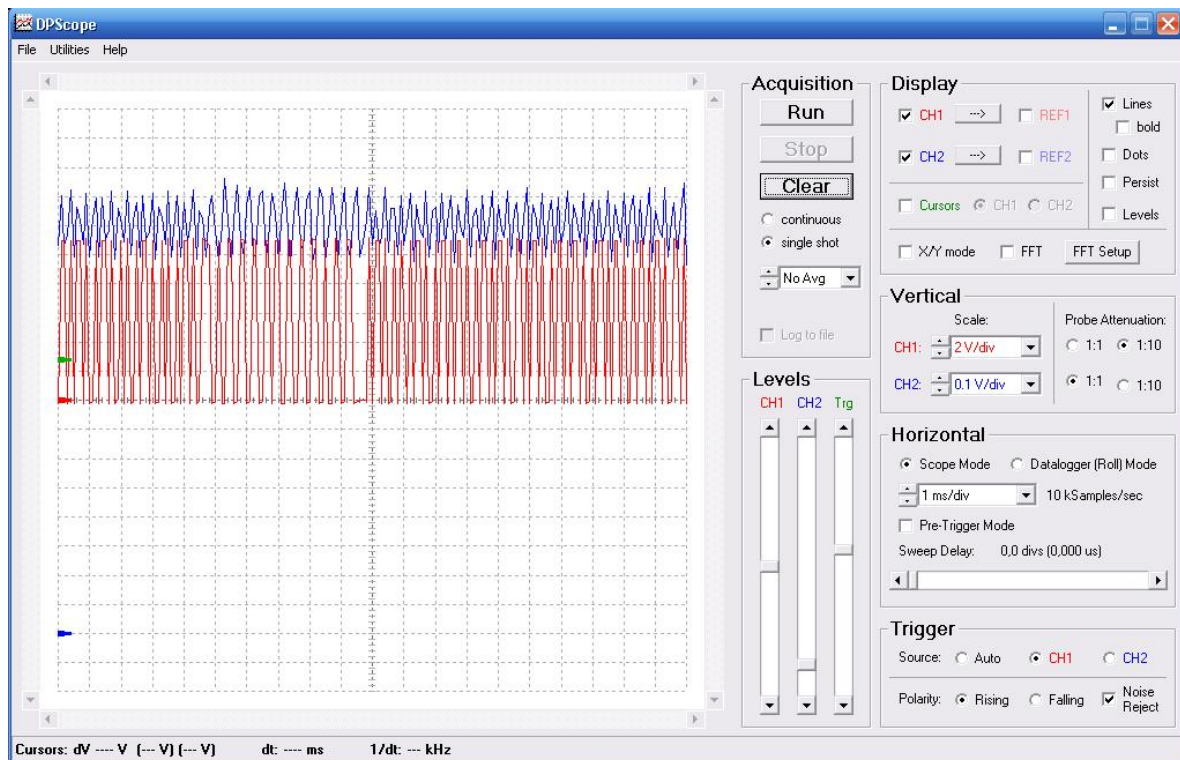


Figura 6.7: Sinais no emissor e no filtro do recetor PLC -Sequência 0100.

na figura 6.14.

Os testes a esta propriedade do circuito, foram realizados com um optocoupler, que não tem encapsulamento do tipo "SMD(Surface Mount Device)". No próximo capítulo, sugere-se a utilização de um optocoupler, que tenha um encapsulamento, idêntico, ao dos restantes componentes utilizados.

Também foi testado, o circuito de medição de temperatura. O mesmo teste, foi executado, utilizando como sensor um *LM335*, e um canal para carga/descarga. Mediu-se a temperatura na célula, que em outros testes, tinha apresentado pior prestação. A figura 6.15, ilustra todo o equipamento utilizado para o efeito. Como é possível verificar no gráfico 6.16, que representa o resultado do teste anterior, submeteu-se o sistema a variações de carga, bem como se carregou e descarregou o mesmo.

Como o algoritmo utilizado para o "EN/DIS", da ventoinha, só começa a ter efeito quando a temperatura atinge os 29 graus, fez-se um teste, em que se submeteu o termómetro a uma variação de temperatura suficientemente alta, para se concluir sobre o algoritmo utilizado. A figura 6.17, ilustra graficamente os resultados obtidos. É de notar no mesmo, que "duty" corresponde ao *duty-cycle*, do sinal PWM que controla a ventoinha, e que a frequência desse sinal é de  $1\text{ KHz}$ .

Uma vez que um dos canais, que neste caso media 3 células, se encontrava de acordo com o pretendido, acoplou-se na PCB mais um canal, ao qual se ligou um conjunto de 6 células já bastante utilizadas, que, segundo o fabricante, tinham uma capacidade de  $2400\text{mAh}$ .

Para o teste da carga e descarga com os 2 conjuntos de células, inicializaram-se os valores de capacidade máxima a,  $3600 \times 3\text{mAh}$ , de capacidade máxima atual, a  $4000\text{mAh}$  e de capa-

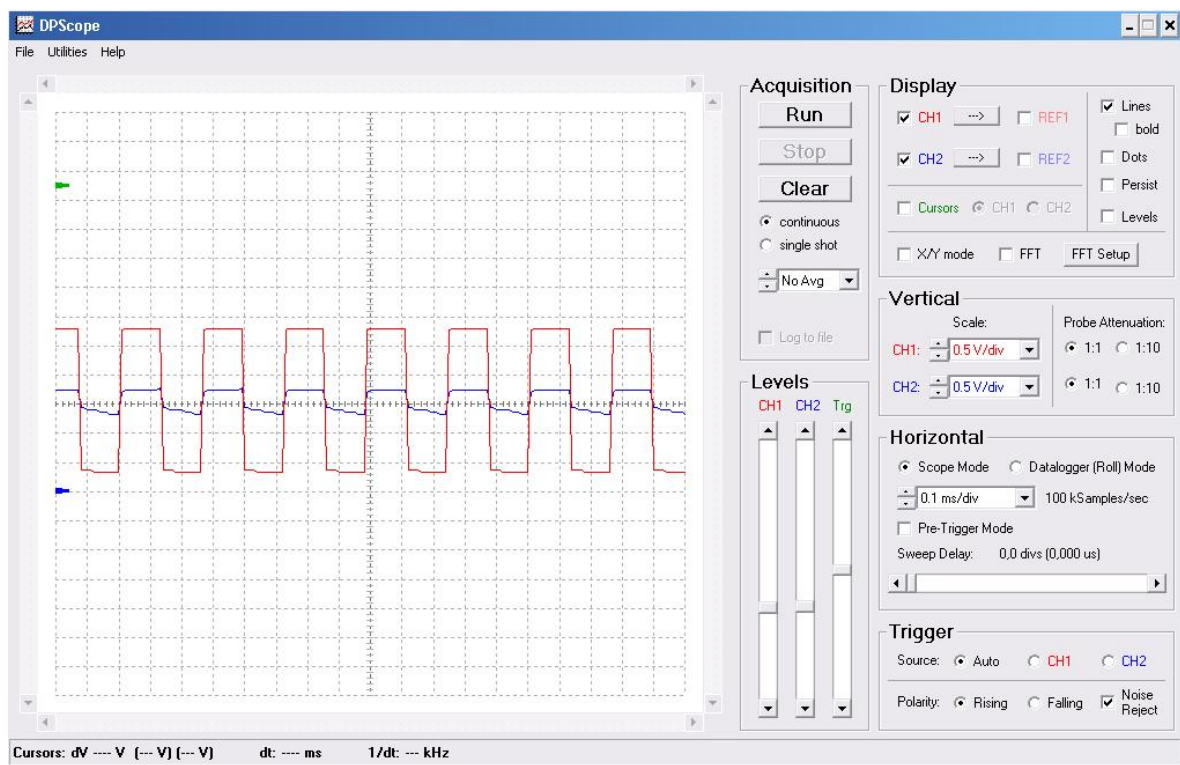


Figura 6.8: Sinais medidos com osciloscópio aos terminais de uma resistência de  $100\Omega$ , quando a carga é o circuito impresso, a uma frequência de  $3850\text{Hz}$ .



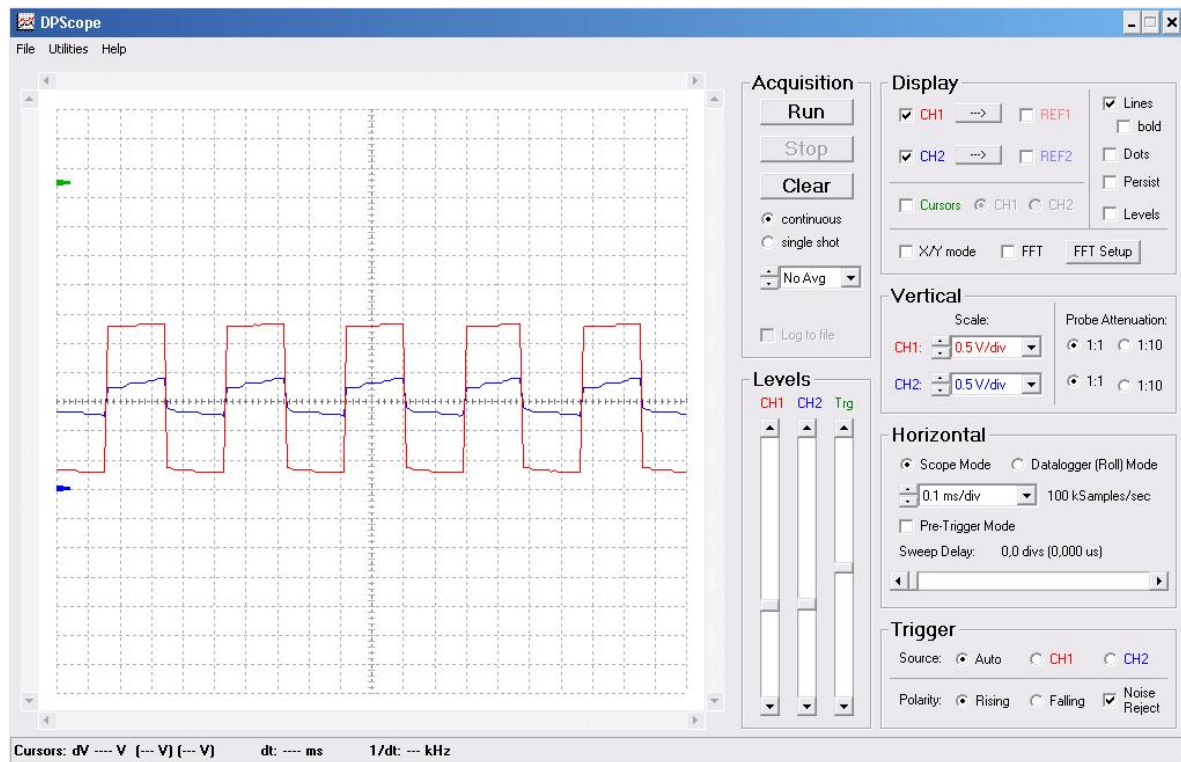


Figura 6.9: Sinais medidos com osciloscópio aos terminais de uma resistência de  $100\Omega$ , quando a carga é o circuito impresso, a uma frequência de  $2650Hz$ .

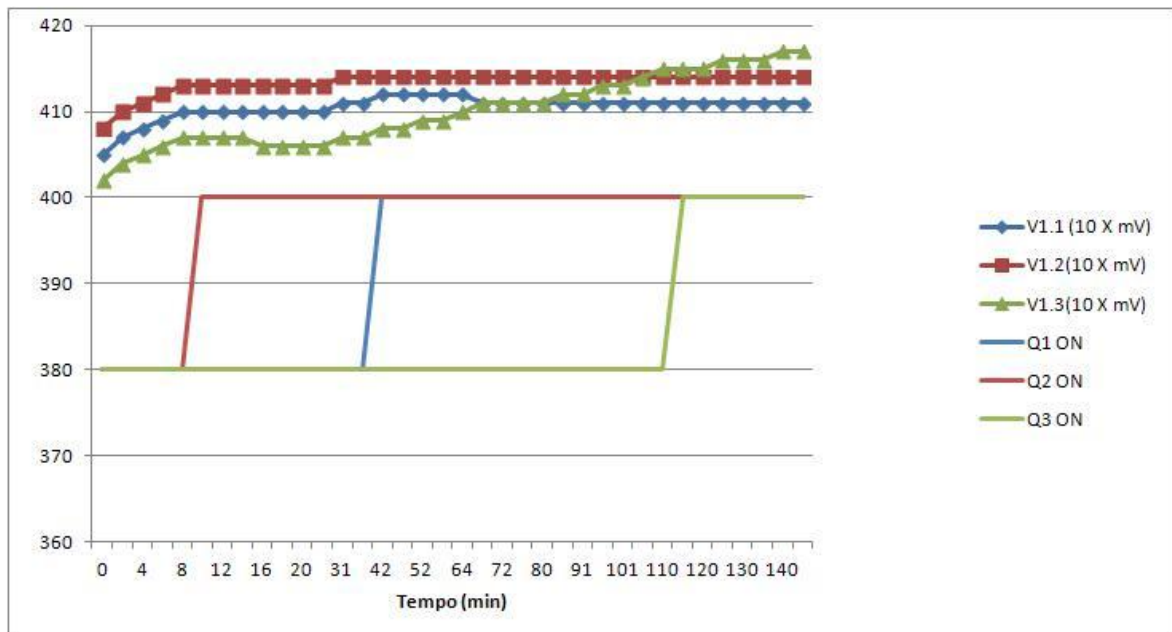


Figura 6.10: Processo de equalização das células.

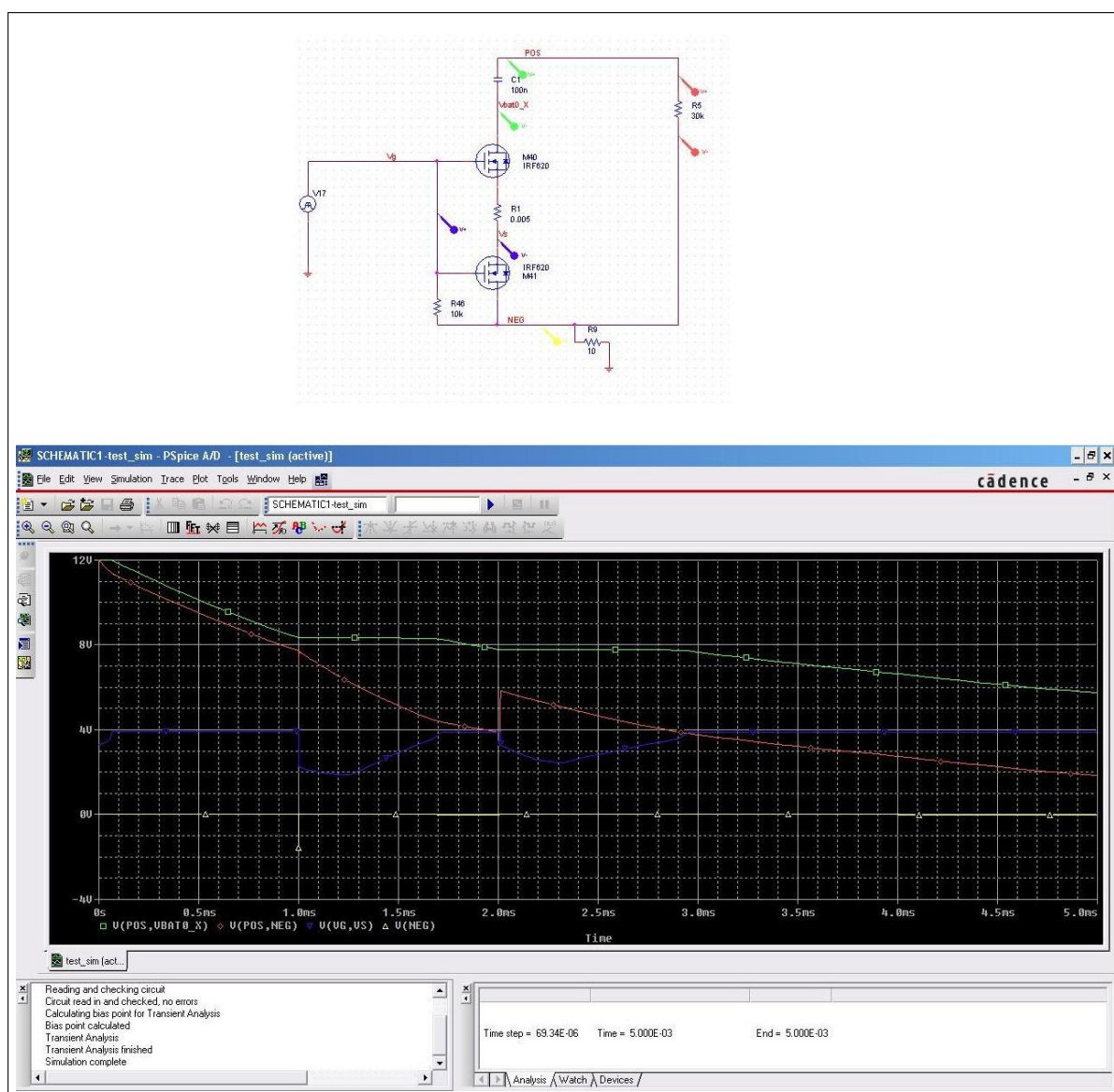


Figura 6.11: Teste ao corte da descarga sem optocoupler.

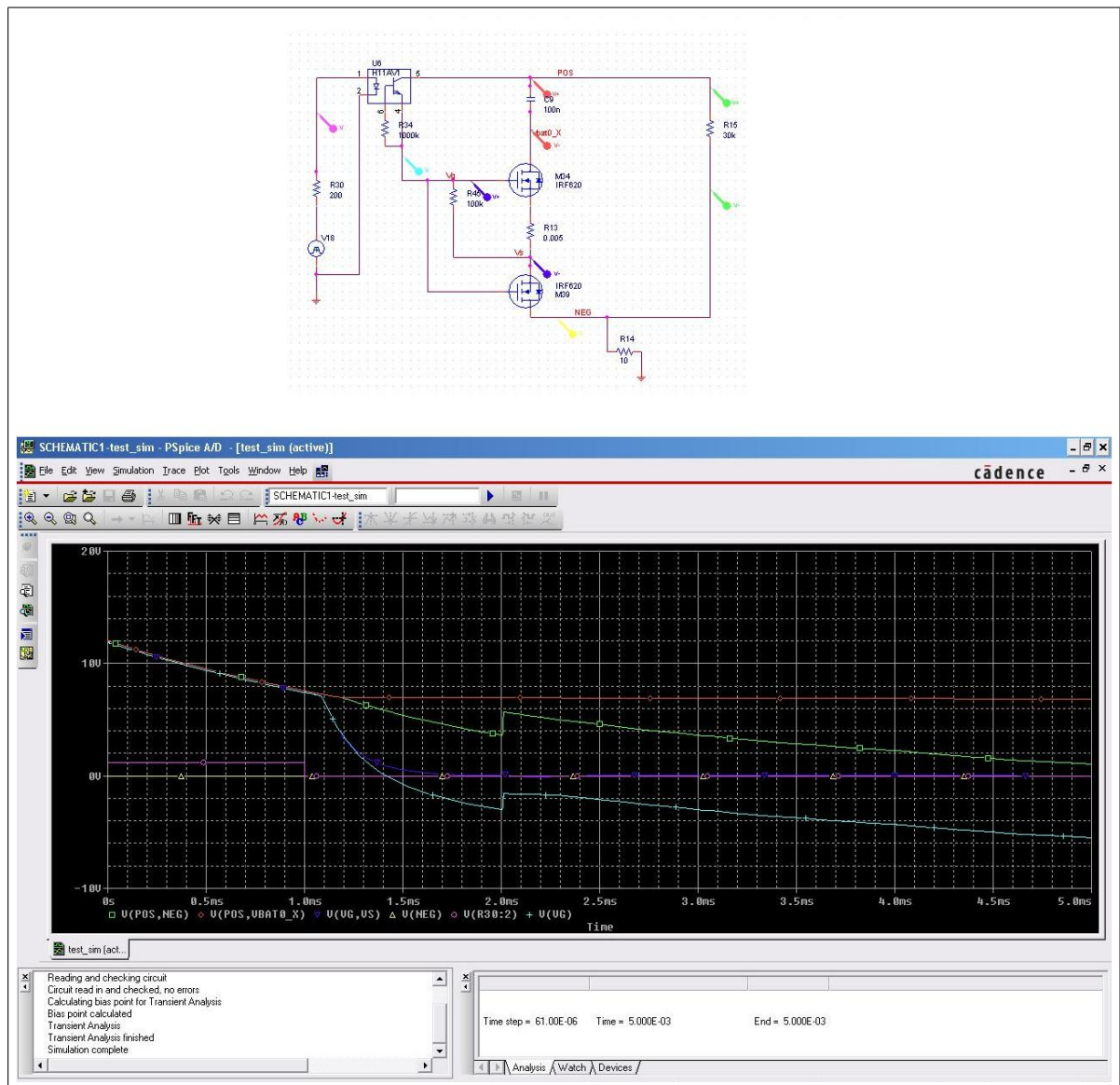


Figura 6.12: Teste ao corte da descarga com optocoupler.

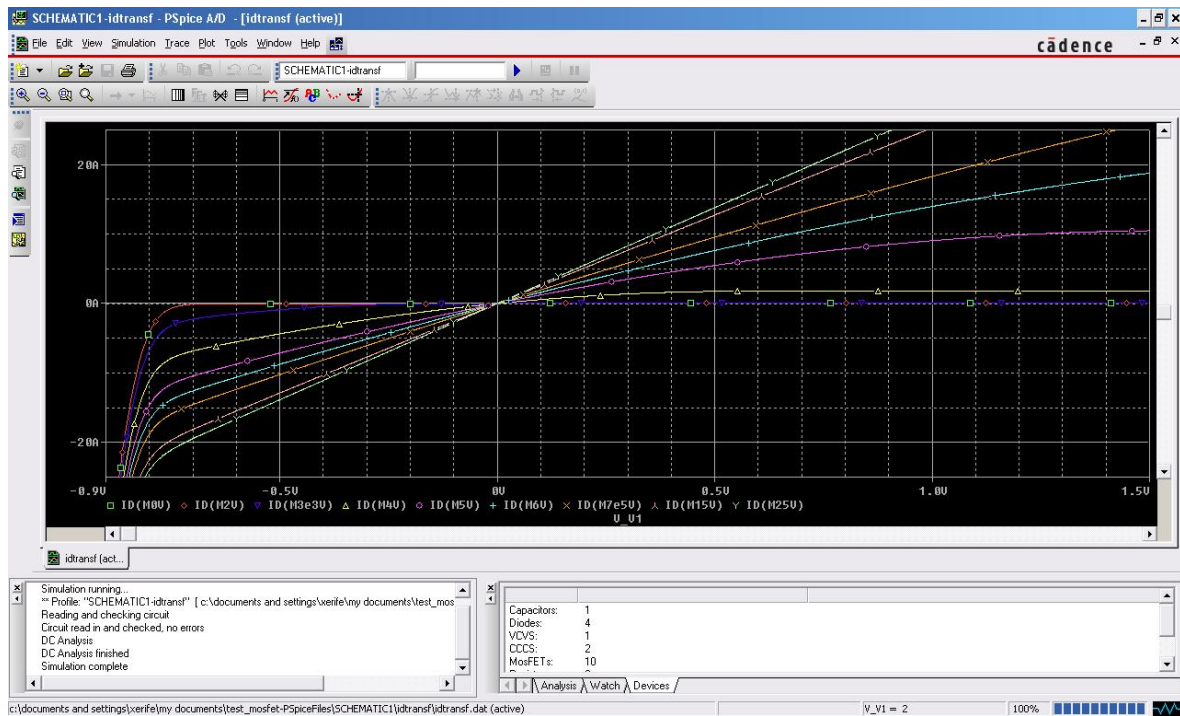


Figura 6.13: Simulação da característica de saída, de um transistor de potência, com diferentes valores de  $V_{GS}$ .

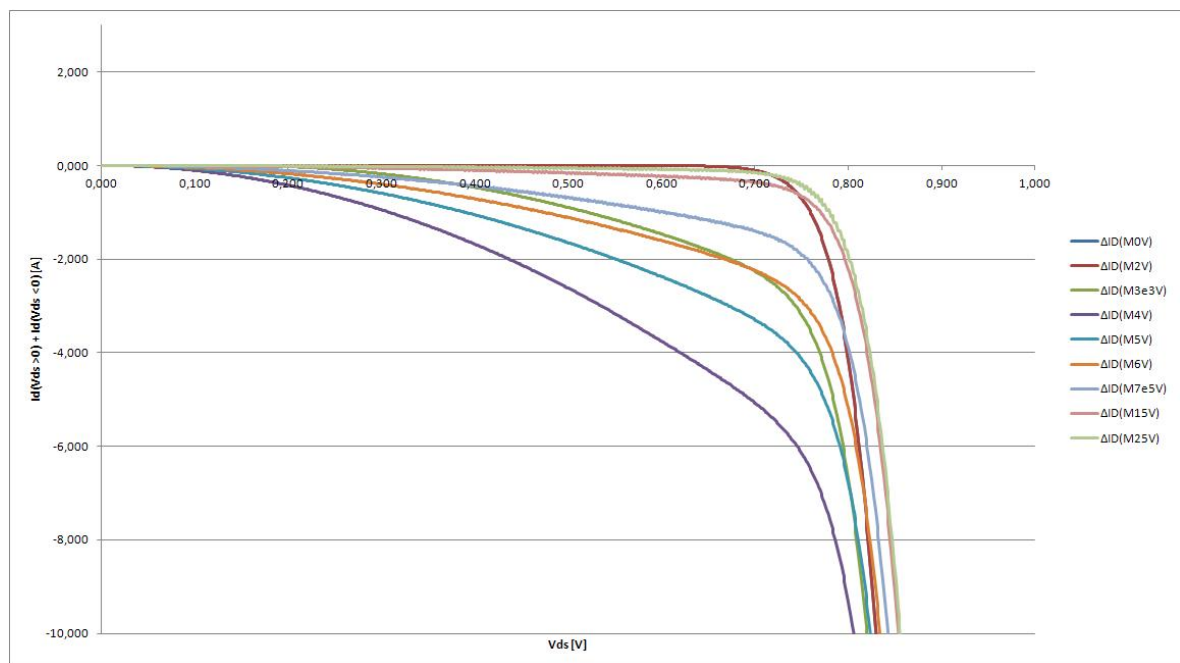


Figura 6.14: Simulação da diferença de condução, de um transistor de potência, entre o primeiro e terceiro quadrante.



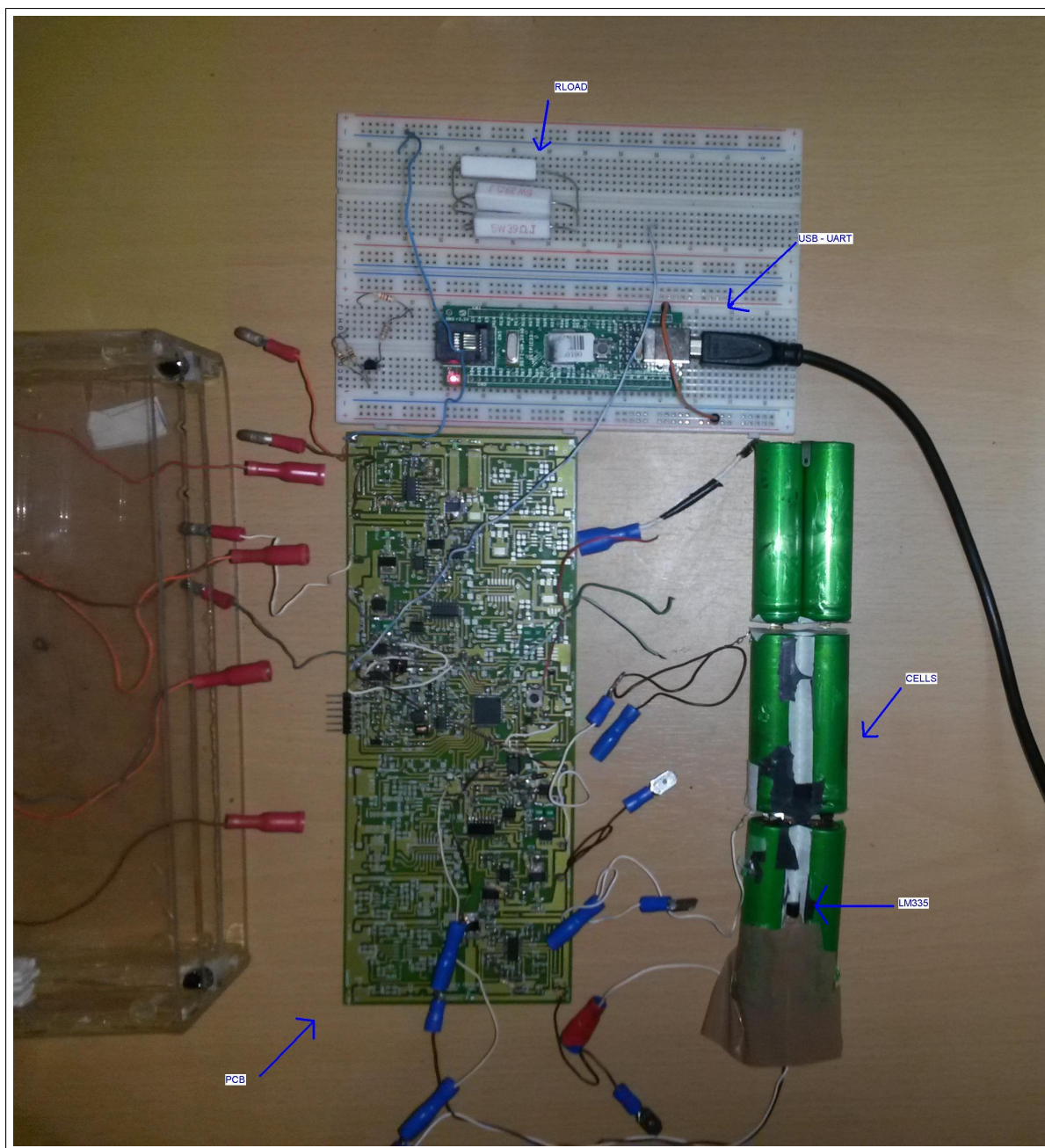


Figura 6.15: Teste ao sensor de temperatura, com carga.

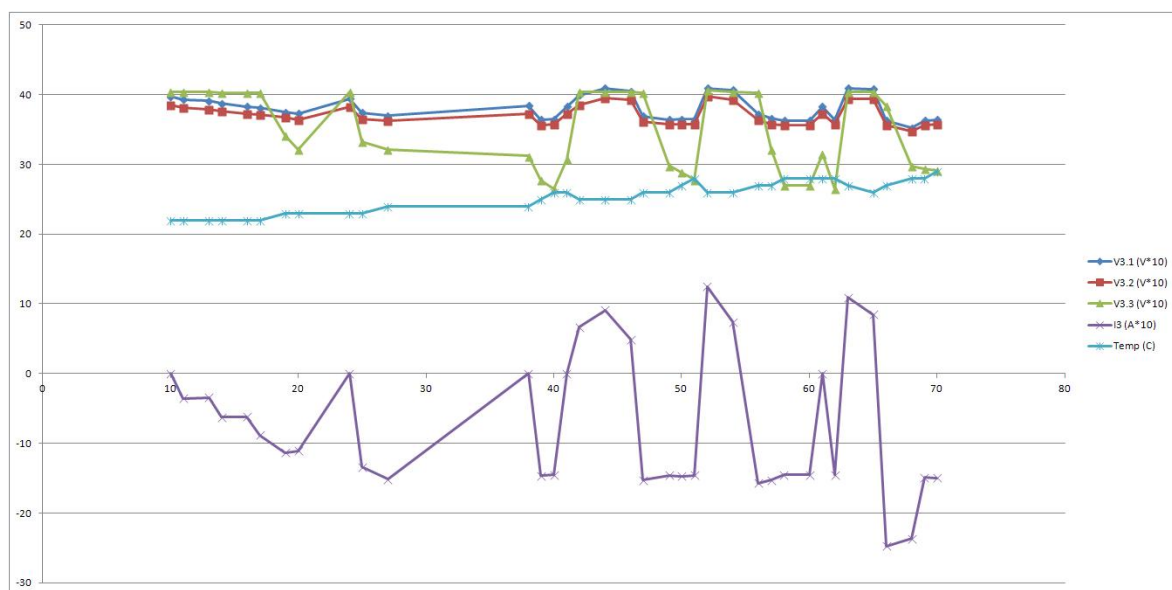


Figura 6.16: Resultados do teste ao sensor de temperatura quando acoplado a uma célula.

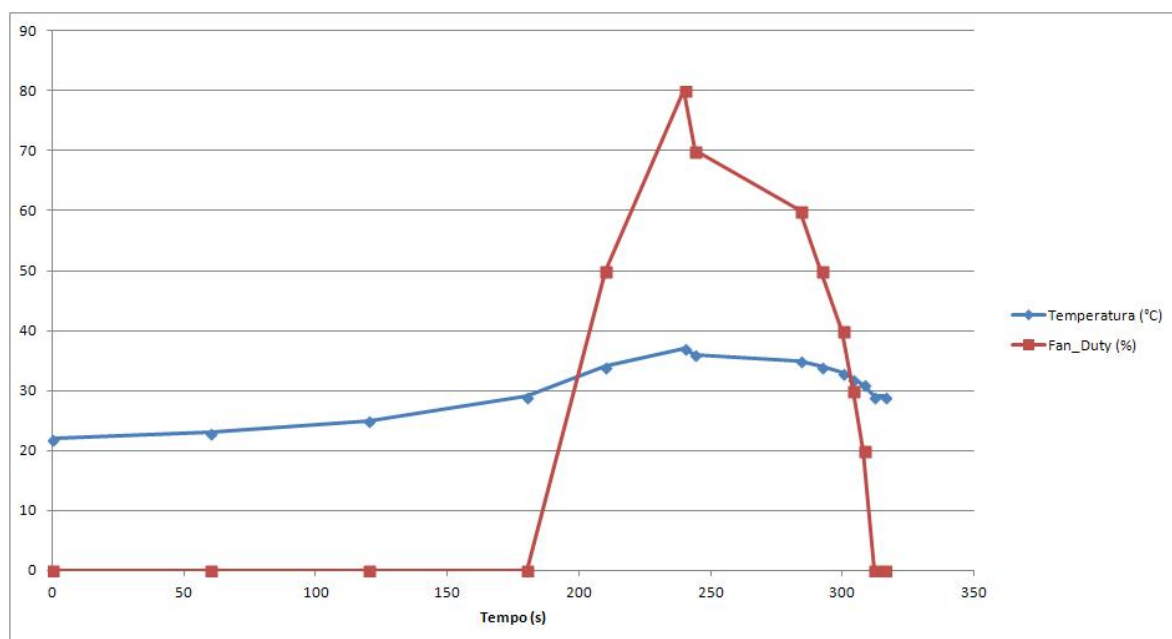


Figura 6.17: Resultados do teste ao sensor de temperatura com aplicação direta de calor.

cidade restante nas células, a  $3600mAh$ . O gráficos presentes na figura 6.18 e 6.19 esboçam os resultados obtidos durante o processo de descarga (utilizando uma carga de aproximadamente  $23.5\Omega$ ). No primeiro caso encontra-se a evolução do potencial nas células, bem como outras características relacionadas com o algoritmo de descarga. No segundo, encontram-se os resultados associados à corrente.

Na continuação do teste anterior, efetuou-se um teste ao processo de carregamento. Nas figuras 6.20 e 6.21 encontra-se a representação gráfica do mesmo, nas condições já anteriormente enunciadas.

Pela análise dos gráficos que representam a corrente, nota-se uma diferença na medição entre o canal 1 e o canal 3. Por uma análise com osciloscópio ao circuito, concluiu-se que o mesmo, resulta do offset dos "OPAMP(Operational Amplifier)", *TS27L2IDT* que efetuam a conversão. Assim sendo, implementou-se um algoritmo de auto-calibração, que consiste na medição e subtração da corrente em cada módulo, quando os outros se encontram desativados.

Para concluir sobre o consumo do circuito, mediu-se a corrente, com um amperímetro, quando apenas um dos canais se encontra acoplado e ligado, e obteve-se, que a corrente por canal + alimentações + optocoupler, é de aproximadamente  $5.82mA$ . Assim, verificou-se a corrente dispendida, para as medições, por canal, através da corrente entregue por cada célula individualmente ao circuito, e obteve-se um total de  $210\mu A$ . Também se verificou, nesta situação, que as correntes de fuga nos transístores, entre canais, são de aproximadamente,  $12\mu A$ . Assim, calculou-se a relação, entre a corrente entregue, por cada célula para o controlo. Foi observado, que a célula 1.1, se encontrava a entregar 19% da corrente, a célula 1.2, 43%, e a 1.3, 38%. É de notar, que existe também alguma corrente de fuga, nos transístores de equalização, no entanto, esta será na ordem das dezenas de  $\mu A$ .

Pode-se então, estimar, que a corrente total que flui no módulo, como sendo:

$$I_{total} = 4.50 + 1.10 * (n \text{ de } opto_{ON}) + 0.21 * (n \text{ de } canais) \quad [mA] \quad (6.1)$$

Por forma, a minimizar o consumo de todo o sistema, e a tentar reduzir ao máximo a potência consumida, utilizou-se o *Watch Dog Timer*, no micro-controlador, para que o módulo de controlo, se encontre maioritariamente em "sleep mode", isto é, que abdique de algumas funcionalidades, para diminuir o consumo de corrente, ao processar o ciclo infinito, que controla todos os parâmetros. Configurou-se o microcontrolador, para sair do "sleep mode", e processar a função de controlo, em intervalos de 0.5s. A corrente total, consumida pelo módulo, nesta situação, quando se encontra acoplado, um conjunto de células é de  $1.8mA$ , o que corresponde a uma redução de cerca de  $4mA$ , em relação ao funcionamento em pleno. A utilização desta opção, tem como principal desvantagem, diminuir a precisão do cálculo, das diferentes variáveis que requerem integração no tempo.

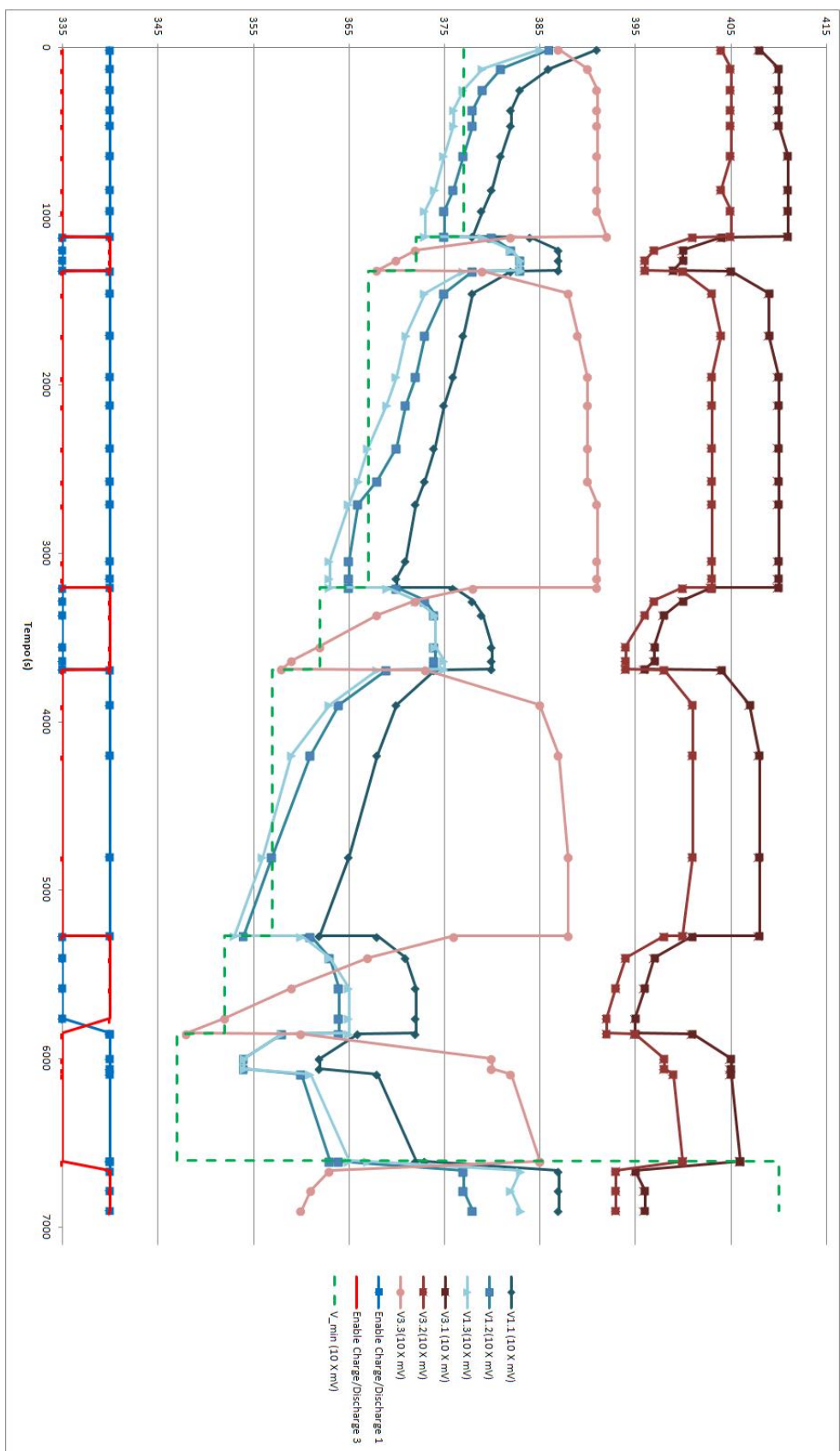


Figura 6.18: Variação do potencial nas células ao longo da descarga.



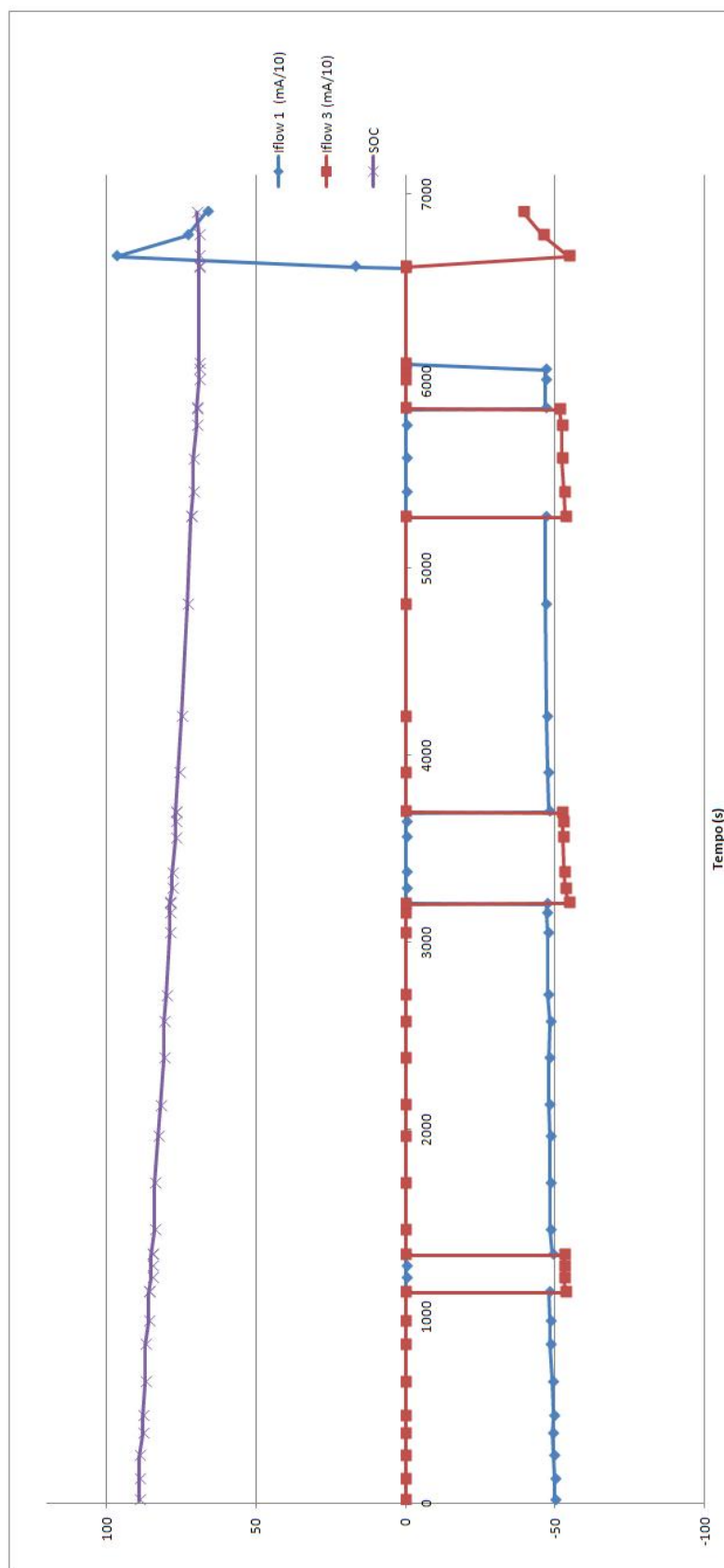


Figura 6.19: Variação da corrente ao longo da descarga.

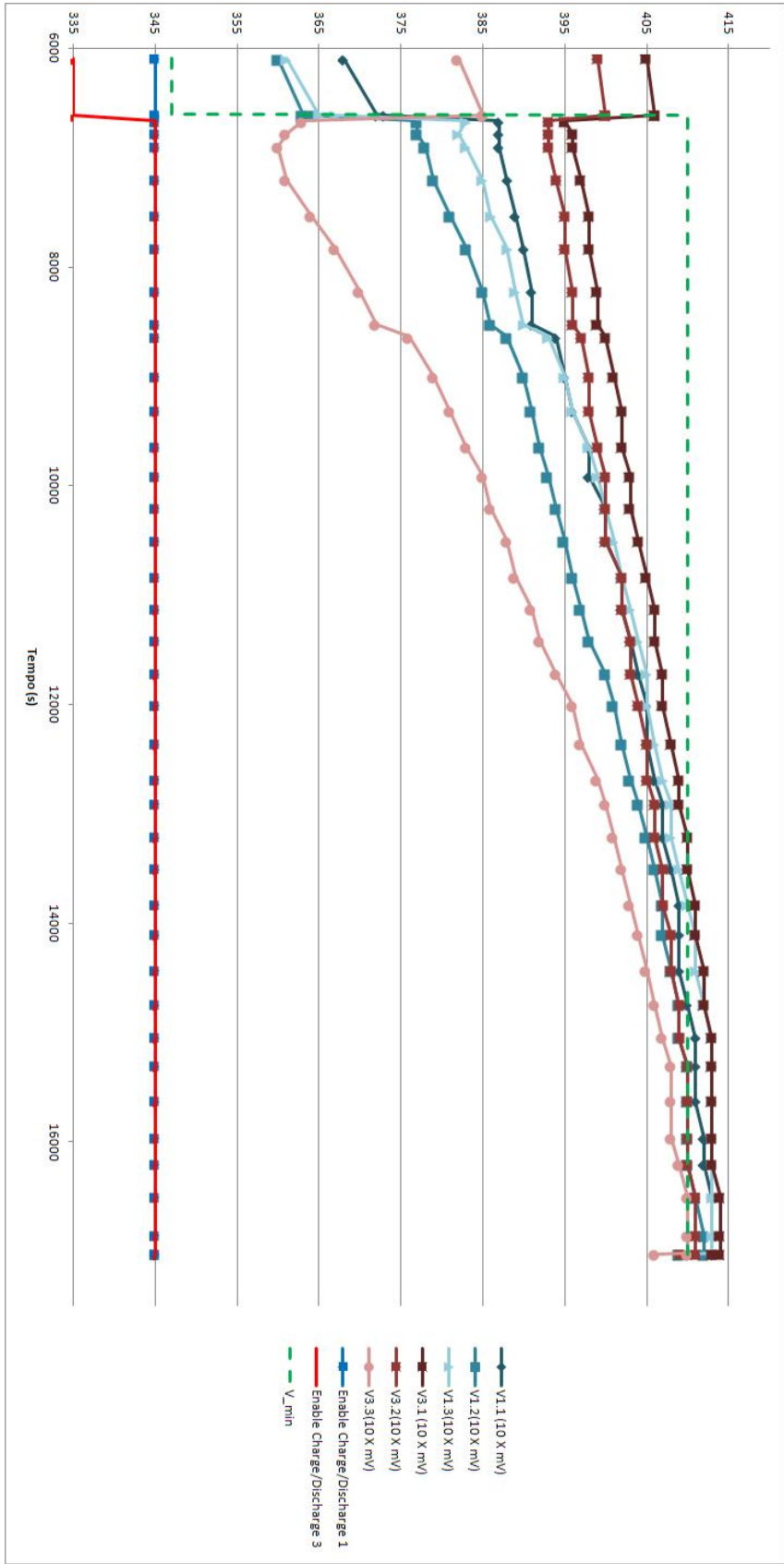


Figura 6.20: Variação do potencial nas células ao longo do processo de carregamento.

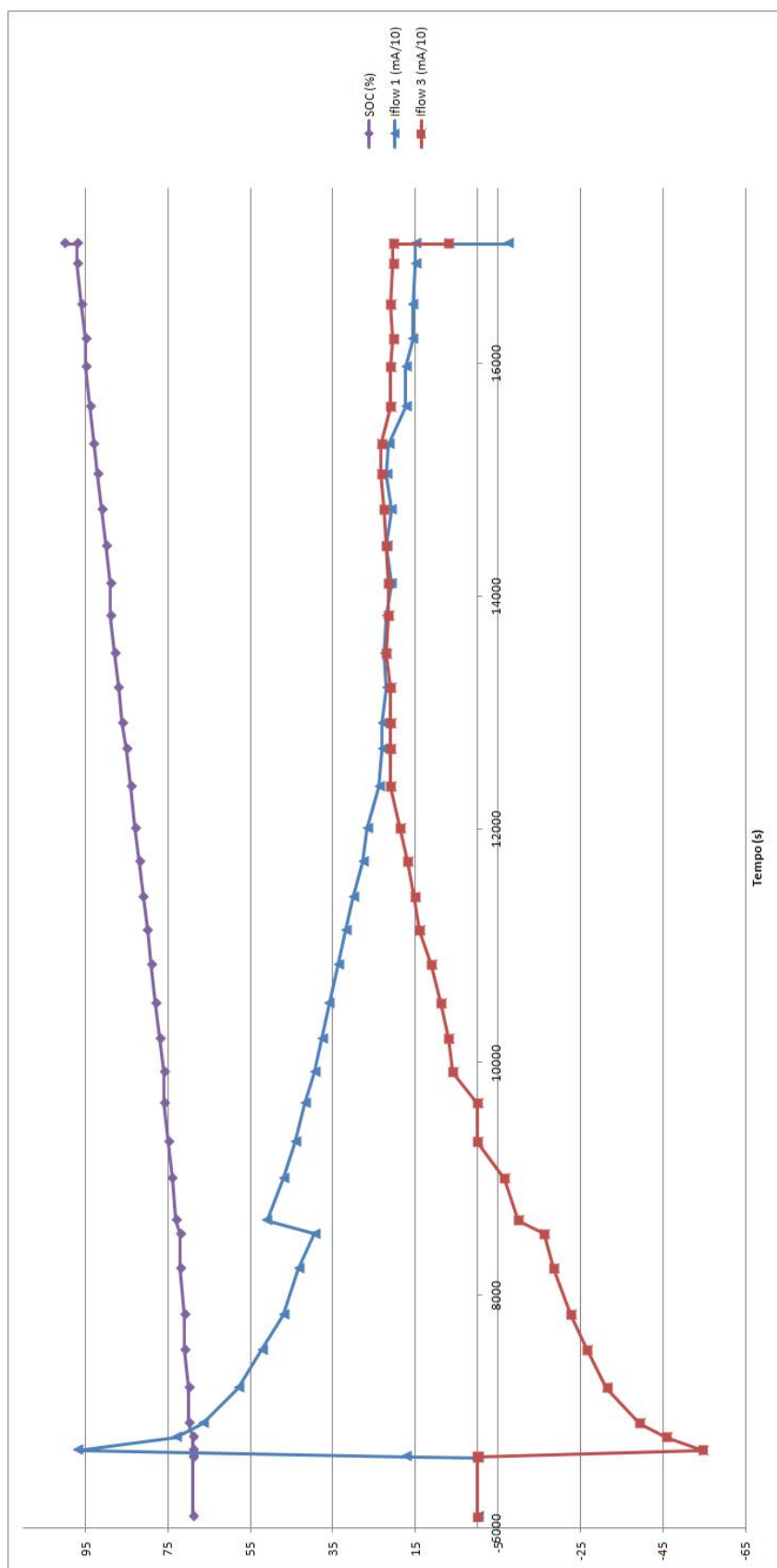


Figura 6.21: Variação da corrente ao longo do processo de carregamento.



## Capítulo 7

# Conclusão e Trabalhos Futuros

### 7.1 Conclusão

Tendo este trabalho, como assunto, uma tecnologia em expansão, o interesse na sua investigação e realização, foi, desde o início, elevado, aliando o facto de acreditar que no futuro os carros elétricos são a solução para se obter uma forma de transporte, mais barata e menos poluente.

Assim, e considerando a bateria como um dos componentes de principal importância no desenvolvimento dos EV's, foi motivante estudar os seus detalhes, bem como tentar otimizar toda a eletrónica que a envolve.

Estudou-se, toda a eletrónica que perfaz uma bateria do tipo inteligente, com condições para executar um carregamento do tipo DC "fast-charging". Para tal, foi projetado um circuito, que eventualmente se veio a imprimir numa PCB, de onde se torna necessário ressaltar as dificuldades de certas opções, relacionadas com as dimensões do mesmo, e com a inovação, associada ao objeto de estudo.

Após a montagem dos componentes na PCB e da configuração do micro-controlador para que efetuasse as funções já designadas na fase de projeto, foram criados algoritmos para a comunicação entre módulos e para o ciclo de vida dos mesmos. Em 7.2, apresenta algumas sugestões de melhoria em relação ao circuito desenvolvido, tendo em conta a fase de testes.

Considerando que, o módulo construído, atingiu todos os objetivos que se pretendiam, mesmo que carecendo de melhorias, conclui-se que existem todas as condições para se continuar com esta investigação. Se ao nível da eletrónica o circuito já se apresenta bastante robusto, optimizações podem ser feitas ao nível do ciclo de vida da bateria, com recurso a algoritmos adaptativos e mais testes à carga e descarga.

É de ressaltar também, que o assunto em estudo, se aplica a todos os sistemas de energia portátil e não apenas na área dos veículos, no entanto, certas características na sua concepção são mais relevantes, em sistemas energéticos de maiores dimensões.

Resta acrescentar que a realização deste projeto foi extremamente enriquecedora ao nível da experiência adquirida no que toca à concepção de circuitos, bem como, ao desenvolvimento de hardware.

## 7.2 Trabalhos futuros

A continuidade deste trabalho, passa agora, pela montagem de uma bateria elétrica dimensionada para um EV. Para tal, vários módulos idênticos ao concebido, teriam que ser criados e acoplados em série e paralelo.

Neste momento, torna-se importante referir, que o código foi criado, de forma a que na inicialização do sistema, apenas 1 dos canais esteja ativo, para evitar, transferência de energia excessiva, entre canais, que naturalmente, se encontram desbalanceados, na fase de acoplamento das células.

Uma vez que o módulo criado necessita de algumas alterações, sugerem-se no próximo subcapítulo melhorias, que se consideram, algumas obrigatórias, outras convenientes, ao aumento da robustez das funcionalidades pretendidas.

Também existem configurações adicionais a efetuar, para que o carregamento se possa proceder segundo um dos protocolos DC, nomeadamente, a comunicação uplink entre os módulos e o computador central do EV (simulado por uma DETPIC32) e a comunicação EV/EVSE, no entanto, toda a informação necessária para que esse aconteça está programada nos módulos.

### 7.2.1 Modificações ao circuito inicial

De forma a resolver os problemas que foram surgindo ao longo do trabalho, algumas alterações foram efetuadas, nos circuitos responsáveis pela medição da corrente e potenciais ,figura 5.9.

Na figura 7.1, constam todas as alterações necessárias, para que o circuito apresente os resultados pretendidos.

Uma recomendação, que tem por finalidade melhorar a precisão do relógio RTCC, e tornar a comunicação mais rápida, é a utilização de um cristal externo, se possível, a uma frequência de oscilação superior (utilizou-se o cristal interno de 8MHz no presente trabalho). As limitações impostas, diminuem a precisão dos cálculos quando estes envolvem tempo e aumentam o tempo de convergência do algoritmo de desmodulação.

Também se sugere, para o aumento da precisão do cálculo do SOC e SOH da bateria, o recurso a algoritmos adaptativos, como por exemplo, o filtro de Kalman [33].

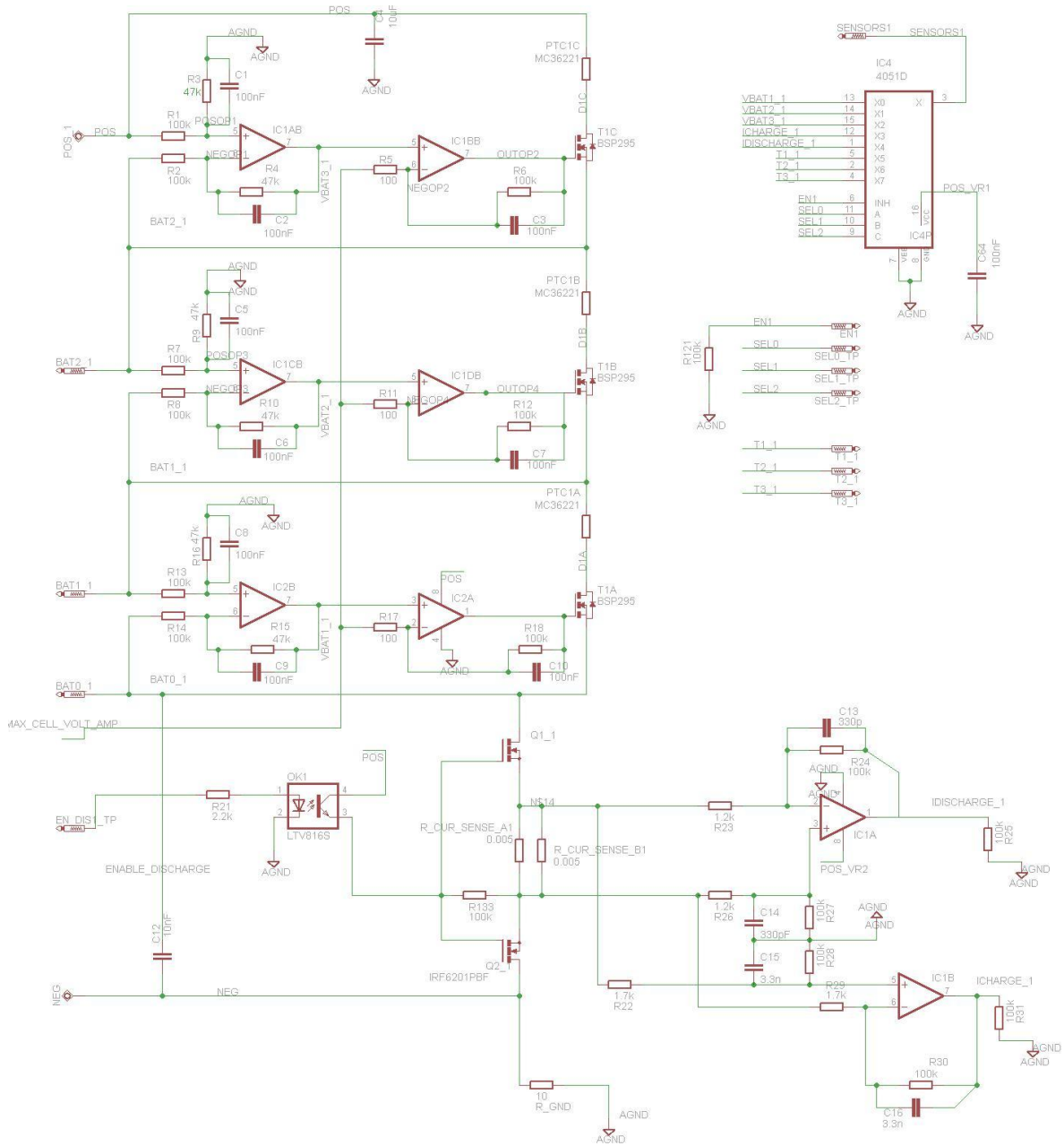


Figura 7.1: Circuito alterado -Medição do potencial, corrente e temperatura / Equalização das células.





# Referências

- [1] G.E. Products. *Rechargeable Batteries Applications Handbook*. EDN Series for Design Engineers. Elsevier Science, 1998.
- [2] Electropaedia. *Cell Chemistries*. Disponível em: <http://www.mpoweruk.com/chemistries.htm>.
- [3] UStudy. *Nickel Cadmium cell*. Disponível em: <http://www.ustudy.in/node/3012>.
- [4] Driving the Nation. *Nickel Metal Hydride Battery (NiMH)*. Disponível em: <http://www.drivingthenation.com/lou-ann-hammond/nickel-metal-hydride-battery-nimh/>.
- [5] Solar Stik. *Solar Stik Battery School*. Disponível em: <http://www.solarstik.com/stikopedia/stiktm-u/battery-school>.
- [6] Marshall Brain. *How Lithium-ion Batteries Work*. How stuff works. Disponível em: <http://www.drivingthenation.com/lou-ann-hammond/nickel-metal-hydride-battery-nimh/>.
- [7] Marshall Brain. *How Lithium-ion Batteries Work*. How stuff works. Disponível em: <http://www.drivingthenation.com/lou-ann-hammond/nickel-metal-hydride-battery-nimh/>.
- [8] LiTHIUM BALANCE. *Introduction to battery management*. Disponível em: <http://www.lithiumbalance.com/battery-management-systems/introduction-to-battery-management>.
- [9] Davide Andrea. *Li-Ion BMS*. Disponível em: [http://liionbms.com/php/wp\\_passive\\_active\\_balancing.php](http://liionbms.com/php/wp_passive_active_balancing.php).
- [10] Jae-MU Yun and Jang-Myung Lee. *A study on the DC power line communication (DC PLC)*, N/A.
- [11] Siemens. *Charging modes for eletric vehicles*. Disponível em: <http://www.chademo.com>.
- [12] Phoenix Contact. *E-Mobility-Steckverbinder*. Disponível em: [https://www.phoenixcontact.com/online/portal/de?ldmy&urile=wcm:path:/dede/web/main/products/subcategory\\_pages/E-mobility\\_plug-in\\_connectors\\_P-20-12/df8e2122-37ca-4529-8a17-ed17e8eba258](https://www.phoenixcontact.com/online/portal/de?ldmy&urile=wcm:path:/dede/web/main/products/subcategory_pages/E-mobility_plug-in_connectors_P-20-12/df8e2122-37ca-4529-8a17-ed17e8eba258).
- [13] *Official CHAdeMO Website*. Disponível em: <http://www.chademo.com>.
- [14] Wikipedia. *CHAdeMO*. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/CHAdeMO>.

- [15] Mennekes. *Intelligent charging stations as a key to electric mobility*. Disponível em: [http://www.mennekes.co.uk/index.php?id=latest&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=47&cHash=af6840dad709046cecfacc4bc91c5e1e](http://www.mennekes.co.uk/index.php?id=latest&tx_ttnews%5Btt_news%5D=47&cHash=af6840dad709046cecfacc4bc91c5e1e).
- [16] SAE EV Charging Systems Committee. *SAE Electric Vehicle Conductive Charge Coupler*. SAE. N/A.
- [17] Battery University. *What's the best battery*. Disponível em: [http://batteryuniversity.com/learn/article/whats\\_the\\_best\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery).
- [18] Claude Ricaud and Philippe Vollet. *Connection system on the recharging spot - a key element for electric vehicles*. Schneider Electric, 2010.
- [19] OpenEVSE - open source hardware. *The basics of the J1772 pilot protocol*. Disponível em: <https://code.google.com/p/open-evse/wiki/J1772Basics>.
- [20] MicroChip. *PIC24FV16KM204 FAMILY Datasheet*.
- [21] BBC. *Tesla boss Elon Musk hints at technology giveaway*. Disponível em: <http://www.bbc.com/news/technology-27741041>.
- [22] Elon Musk. *All Our Patents Are Belong To You*. Tesla. Disponível em: <http://www.teslamotors.com/blog/all-our-patent-are-belong-you>.
- [23] David Herron. *European Parliament Considers Legislation To Kill CHAdeMO Electric Car Chargers*, 2013. Disponível em: <http://www.plugin cars.com/european-parliament-mulling-legislation-would-terminate-chademo-127927.html>.
- [24] Fiona Hall. *No electric car charger ban*, 2013. Disponível em: <http://fionahall.org.uk/en/article/2013/713537/no-electric-car-charger-ban-hall>.
- [25] EFACEC. *EFACEC QC 45 Product Portfolio*.
- [26] S. Dhameja. *Electric Vehicle Battery Systems*. Elsevier Science, 2001.
- [27] BASF. *Nickel Metal-Hydride*. Disponível em: [http://www.mennekes.co.uk/index.php?id=latest&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=47&cHash=af6840dad709046cecfacc4bc91c5e1e](http://www.mennekes.co.uk/index.php?id=latest&tx_ttnews%5Btt_news%5D=47&cHash=af6840dad709046cecfacc4bc91c5e1e).
- [28] Mary Bellis. *Alessandro Volta (1745-1827)*. Disponível em: [http://inventors.about.com/od/utstartinventors/a/Alessandro\\_Volta.htm](http://inventors.about.com/od/utstartinventors/a/Alessandro_Volta.htm).
- [29] Wen-Yeau Chang. *The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review*, 2013.
- [30] N/A. *FSK Modulation and Demodulation With the MSP430 Microcontroller*, 1998.
- [31] N/A. *FSK Power Line Communications SoC - Atmel ATPL100A*, 2012.
- [32] T. López, R. Elferich, and E. Alarcón. *Voltage Regulators for Next Generation Microprocessors*. SpringerLink : Bücher. Springer, 2010.
- [33] T. Huria, M. Ceraolo, and J. Gazzarri. *Simplified Extended Kalman Filter Observer for SOC Estimation of Commercial Power-Oriented LFP Lithium Battery Cells*, 2013.